

Федеральное агентство по образованию

УДК 524.3; 524.33; 524.387
ГРНТИ 41.23.29; 41.23.02, 41.23.15; 41.23.21
Инв. №

ПРИНЯТО:	УТВЕРЖДЕНО:
Приемочная комиссия Государственного заказчика	Государственный заказчик Федеральное агентство по образованию
От имени Приемочной комиссии _____/ Е.П. Попова /	От имени Государственного заказчика _____/ А.В. Рождественский/

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 1 этапа Государственного контракта
№ П919 от 20.08.2009 г.

Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» (ГОУ УрГУ)

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук»

Проект: «Фотометрическое и спектральное исследование явлений нестационарности в тесных двойных системах»

Руководитель организации: _____ /А.О. Иванов /
м.п.

Руководитель проекта: Кожевникова Алла Валерьевна

Согласовано:

Управление научных исследований и
инновационных программ
От имени Заказчика

_____/Кошкин В.И./

Екатеринбург
2009 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту от 20.08.2009 № П919 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» (ГОУ УрГУ)

Руководитель проекта:

№ п/п	ФИО	дата рождения	ученая степень, ученое звание	место работы	должность	подпись
1	Кожевникова Алла Валерьевна	16.10.1978	к. ф-м. н.	Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета	Старший научный сотрудник	

Основные Исполнители проекта:

№ п/п	ФИО	дата рождения	ученая степень, ученое звание	место работы	должность	подпись
2	Кожевников Валерий Петрович	12.01.1951	к. ф-м. н	Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета	Руководитель лаборатории	
3	Аввакумова Екатерина Анатольевна	04.03.1982	б/с	Уральский государственный университет им. А.М. Горького	Ассистент кафедры астрономии и геодезии	
4	Дорогов Алексей Александрович	05.12.1990	б/с	Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета	Студент кафедры астрономии и геодезии, лаборант-исследователь	
5	Юшков Иван Андреевич	02.11.1990	б/с	Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета	Студент кафедры астрономии и геодезии, лаборант-исследователь	

Реферат

Отчет 56 с., 5 ч., 12 рис., 3 табл., 44 источн., 0 прил.

Переменные звезды, звездная активность, запятненность, катаклизмические переменные, вспышки, фотометрия, тесные двойные системы, эволюция звезд

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 1 этапу Государственного контракта № П919 "Фотометрическое и спектральное исследование явлений нестационарности в тесных двойных системах" (шифр "НК-184П") от 20 августа 2009 г. по направлению "Астрономия, астрофизика и исследования космического пространства" в рамках мероприятия 1.3.1 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук.", мероприятия 1.3 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук и целевыми аспирантами в научно-образовательных центрах", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - исследование нестационарных процессов в трех типах тесных двойных систем: в катаклизмических переменных, в хромосферно-активных системах поздних спектральных классов типа RS CVn, и в массивных двойных системах ранних спектральных классов на основе фотометрических и спектральных наблюдений.

Методы, использованные при выполнении отдельных видов работ (этапов) по Государственному контракту: Фотометрические наблюдения звезд с помощью 70-см телескопа и многоканального электрофотометра, регистрирующего одновременно блеск двух звезд и фона неба;

Инструментарий, использованный при выполнении отдельных видов работ (этапов) по Государственному контракту: 1. АВР-2: 70-см телескоп-рефлектор с многоканальным электрофотометром; 2. Электронные базы данных библиотеки Уральского государственного университета.

Результаты, полученные при выполнении отдельных видов работ (этапов) по Государственному контракту: Материалы теоретических и экспериментальных исследований, раскрывающие содержание работ по решению поставленных научно-исследовательских задач, включая: результаты экспериментальных и теоретических исследований; аналитический обзор; обоснованный вариант направления исследований; план проведения экспериментальных и теоретических исследований.

Содержание

Обозначения и сокращения	6
Введение	7
1 Аналитический обзор	9
1.1 Катаклизмические переменные звезды.....	9
1.2 Хромосферно-активные двойные системы типа RS CVn.....	15
1.3 Тесные массивные двойные системы ранних спектральных классов	20
2 Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований	22
2.1 Фотометрические исследования.....	23
2.2 Спектральные исследования.....	29
3 План проведения экспериментальных и теоретических исследований	33
3.1 Разработка программы фотометрических наблюдений катаклизмических переменных звезд на 70-см телескопе и многоканальном фотометре	33
3.2 Разработка программы многоцветных фотометрических наблюдений хромосферно-активных двойных звезд типа RS CVn на 70-см телескопе и многоканальном фотометре	36
4 Результаты экспериментальных и теоретических исследований I этапа..	40
4.1 Проведение фотометрических наблюдений активной переменной системы CG Cyg, относящейся к типу RS CVn на 70-см телескопе	40
4.2 Анализ фотометрических наблюдений катаклизмической переменной EI UMa, проведенных на 70-см телескопе в 2008 г.....	42
4.3 Фотометрические наблюдения промежуточного поляра XSS J00564+4548 на 70-см телескопе	46
4.4 Проведение спектральных наблюдений хромосферно-активной звезды GSC 2038-0293 с целью построения кривой лучевых скоростей и дальнейшего определения физических параметров этой звезды.....	47
4.5 Анализ результатов решения многоцветных фотометрических наблюдений тесных массивных двойных систем ранних спектральных классов.....	49
5 Заключение.....	51
Список использованной литературы.....	54

Обозначения и сокращения

АО УрГУ — Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета,

ИНАСАН — Институт астрономии Российской академии наук,

МГУ — Московский государственный университет,

САО РАН — Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук,

ИЗМИРАН – Институт земного магнетизма Российской академии наук

ПЗС — прибор с зарядовой связью,

НИР – научно-исследовательская работа,

ТДС — тесная двойная система,

УрГУ —Уральский государственный университет,

ФЭУ — фотоэлектронный умножитель,

ЛТР – локальное термодинамическое равновесие

Введение

Изучение переменных звезд является важнейшим методом исследования физики и эволюции звезд. Особенно это относится к физике и эволюции тесных двойных систем. Настоящий проект посвящен развитию исследований явлений нестационарности в трех типах тесных двойных систем: катаклизмических переменных звездах, активных звездах поздних спектральных классов типа RS CVn, а также в массивных тесных двойных звездах ранних спектральных классов с газовыми потоками. Среди многочисленных подтипов тесных двойных звезд, эти системы не только дают ценную информацию для изучения физики и эволюции звезд, но и могут эффективно исследоваться с помощью технических средств, которыми располагает Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета.

В Астрономической обсерватории УрГУ в течение ряда лет проводятся фотометрические наблюдения катаклизмических переменных звезд с целью изучения двух фундаментальных астрофизических процессов – эволюции двойных звезд и процессов аккреции вещества, посредством поиска и анализа периодических колебаний блеска этих звезд. Методика наблюдений и методы их анализа постоянно совершенствуются. Была создана полностью автоматизированная фотометрическая система, состоящая из 70-см телескопа и многоканального фотометра, работающих под управлением компьютера, которая на практике продемонстрировала свою высокую эффективность для таких исследований. В последние годы эту технику мы начали применять и для исследования хромосферно-активных запятненных звезд типа RS CVn. Мы убедились, что и для звезд этого типа с помощью этой системы могут быть получены высокоточные фотометрические данные, позволяющие проводить исследование нестационарных процессов, вызванных магнитной активностью, и строить модели запятненности таких звезд.

В настоящее время в АО УрГУ вводится в эксплуатацию телескоп с диаметром зеркала 1.2 м, оснащенный спектрографом высокого разрешения и ПЗС-матрицей. На нем будут возможны спектральные наблюдения ярких звезд

типа RS CVn. Кроме этого, мы будем использовать спектральные наблюдения звезд этого типа на других обсерваториях, сделанные по нашей заявке.

Детальное изучение проявлений звездной активности – эволюции звездных пятен, их широтного и долготного распределения, циклов активности, а также корреляции запятненности с другими индикаторами активности и фундаментальными характеристиками звезд позволит исследовать структуру магнитных полей, что имеет большое значение для развития теории звездного магнетизма и возможности проверки моделей солнечного динамо-механизма.

Результаты исследования периодических колебаний блеска в какклизмических переменных позволят судить о строении наблюдавшихся систем и свойствах аккреционных потоков в них, что важно для понимания природы явлений, происходящих в этих системах.

Массивные тесные двойные звезды ранних спектральных классов также представляют значительный интерес благодаря наличию в них газовых потоков, которые могут выявляться путем анализа высокоточных фотометрических данных. Учитывая влияние околозвездного вещества и связанных с ним нестационарных процессов на получаемые из наблюдений физические параметры звезд можно определить особенности эволюции таких систем и их компонентов.

1 Аналитический обзор

1.1 Катаклизмические переменные звезды

Изучение переменных звезд является важнейшим методом исследования физики и эволюции звезд. Катаклизмические переменные представляют собой особенно интересную группу таких звезд. Благодаря разнообразию свойств и их наблюдательных проявлений катаклизмические переменные представляют собой уникальную лабораторию для изучения двух фундаментальных астрофизических процессов – эволюции двойных звезд и аккреции. В такой двойной системе одна из звезд является белым карликом, а вторая – звездой, напоминающей Солнце, но более красной и менее массивной. Орбитальные периоды таких двойных систем – от суток до часа. Красная звезда-компаньон, заполняя свою полость Роша, теряет вещество и передает его белому карлику. Из-за сохранения углового момента падающий газ не может падать непосредственно на поверхность белого карлика. В системах, в которых белый карлик не имеет сильного магнитного поля, падающее вещество формирует аккреционный диск.

Подтипы немагнитных катаклизмических переменных определяются наличием и характеристиками наблюдающихся в них вспышек или их отсутствием. Карликовые новые подтипа U Gem характеризуются вспышками длительностью от дней до месяцев и амплитудой 2-5 зв. величин. Карликовые новые подтипа SU UMa кроме обычных вспышек показывают сверхвспышки большей длительности и амплитуды. Карликовые новые подтипа Z Cam помимо обычных вспышек и состояния покоя могут находиться в состоянии промежуточного блеска (standstill). Новоподобные переменные являются яркими системами, не показывающими сильных вспышек. Звезды подтипа VY Scl – подтип новоподобных переменных, показывающих состояния пониженного на 2-6 зв. величин блеска длительностью от месяцев до года и более.

Аккреция вещества на белые карлики, обладающие мощным магнитным полем, происходит под управлением этого поля. Среди магнитных

катаклизмических переменных различают поляры (или звезды подтипа AM Her), содержащие синхронно вращающийся магнитный белый карлик и полностью лишенные аккреционного диска, и промежуточные поляры (или звезды подтипа DQ Her) – несинхронные системы, в которых только внутренние части аккреционного диска разрушены магнитным полем.

Проявления переменности катаклизмических переменных многообразны. Для всех катаклизмических переменных характерен фликеринг – аperiodические колебания блеска на временах от десятков минут до секунд, природа которого представляется не ясной. Свойства фликеринга рассмотрены в работах Фрица и Бруха [1], Заманова и Бруха [2] и Бруха [3]. Считается, что исходя из соображений энергетики этого загадочного процесса, его источником могут быть внутренние части аккреционного диска, хотя фликеринг наблюдается и в полярах, которые лишены аккреционных дисков. Общепринятых физических моделей фликеринга нет.

При наклонениях плоскостей орбит превышающих 60° катаклизмические переменные могут показывать затмения белого карлика и аккреционного диска вторичным компонентом системы. Большая часть того, что известно о строении катаклизмических переменных, вытекает из наблюдений таких затменных систем, хотя катаклизмические переменные с затмениями крайне редки. Типичные детали орбитальных кривых блеска затменных систем и их интерпретация приведены в обзорной статье Марша [4]. Кроме затмений белого карлика могут наблюдаться также затмения центральных областей аккреционного диска его внешними частями и затмения вторичного компонента системы аккреционным диском [5]. Когда наклонение орбиты превышает 50° , но недостаточно для затмений, орбитальная переменность может вызываться изменением видимости горячего пятна на краю диска, возникающего в том месте, где струя аккрецируемого вещества ударяет в диск. При этом на орбитальной кривой блеска в определенных ее фазах возникает горб. При еще меньших наклонениях орбитальная переменность может вызываться изменениями ракурса аккреционного диска, но такая орбитальная переменность

имеет небольшую амплитуду и трудно обнаружима из-за шума в кривой блеска, вызываемого фликерингом и непериодическими изменениями блеска, которые могут вызываться изменением темпа аккреции.

В карликовых новых подтипа SU UMa, находящихся в состоянии сверхвспышки, может наблюдаться явление, называемое сверхгорбами. Сверхгорбы имеют периоды на несколько процентов длиннее орбитального периода и могут вызываться прямой прецессией эллиптического аккреционного диска. В ярких новоподобных переменных тоже могут наблюдаться сверхгорбы, которые в этом случае называются перманентными, потому что наблюдаются независимо от вспышек. Однако перманентные сверхгорбы могут быть как положительными, так и отрицательными, т.е. наблюдаются как колебания блеска с периодами на несколько процентов длиннее, так и на несколько процентов короче орбитального периода. Происхождение и причины возникновения положительных сверхгорбов, как перманентных, так и наблюдающихся в состоянии сверхвспышки, поняты достаточно хорошо. Они могут вызываться прямой прецессией эллиптического аккреционного диска. Эллиптичность аккреционного диска и его прямая прецессия возникают в системах, имеющих большие аккреционные диски и малое отношение масс компонентов $q < 0.35$, $q = M_2/M_1$. Здесь M_1 -масса белого карлика, M_2 -масса вторичного компонента [6]. Это явление аналогично смещению перигелия орбиты Меркурия, наблюдающееся в Солнечной системе.

Однако причины отрицательных сверхгорбов представляются не выясненными. Общие характеристики отрицательных сверхгорбов и их распространенность среди катаклизмических переменных различных подтипов приведены в работе Реттера и Нейлора [7]. Некоторые новые данные об отрицательных сверхгорбах приведены в работе Паттерсона и др. [8]. Хотя причины колебаний блеска с периодом на несколько процентов короче орбитального периода легко понять, предположив, что аккреционный диск наклонен к плоскости орбиты и прецессирует в обратном направлении, аналогично прецессии земной оси, тоже наклоненной к орбитальной плоскости,

причины, приводящие к наклону диска не поняты. Паттерсон и др. [8] утверждают, что этой причиной может быть магнитное поле белого карлика. Однако модельные расчеты Муррея [9] показывают, что, хотя магнитное поле белого карлика может приводить к наклону аккреционного диска, диск будет вращаться совместно с белым карликом и не сможет дать периодов типичных для отрицательных сверхгорбов.

Звезды подтипа VY Scl - подтип новоподобных переменных, показывающих состояния пониженного на 2-6 зв. величин блеска длительностью от месяцев до года и более. Они имеют орбитальные периоды около 4 часов, т.е. находятся вблизи так называемого пробела в распределении орбитальных периодов, который занимает область 2-3 часа. Звезды подтипа VY Scl имеют высокий темп аккреции, который достаточен для того, чтобы на поверхности белого карлика происходило квазинепрерывное термоядерное горение аккрецируемого водорода [10, 11]. В этих звездах часто наблюдаются отрицательные сверхгорбы, а также чередование отрицательных и положительных сверхгорбов.

Причины, приводящие к наклону аккреционного диска и его обратной прецессии, достаточно хорошо поняты для ярких рентгеновских двойных типа HerX-1, обладающих очень высокой аккреционной светимостью, и для сверхмягких рентгеновских источников (прототип QR And), светимость центрального источника в которых также очень высока благодаря квазинепрерывному термоядерному горению аккрецируемого водорода на поверхности белого карлика. В таких объектах наклон аккреционного диска и его прецессия вызываются действием мощного излучения центрального источника [12, 13]. Сопоставив оценки светимости для звезд подтипа VY Scl, сделанные Грейнером и др. [10, 11], и результаты модельных расчетов Фолкеса и др. [13], мы пришли к выводу, что отрицательные сверхгорбы в звездах подтипа VY Scl, а также чередование отрицательных и положительных сверхгорбов в этих звездах, могут также вызываться действием излучения, возникающего при

квазинепрерывном термоядерном горении аккрецируемого водорода на поверхности белого карлика [14].

Звезды подтипа SW Sex выделяют в отдельную группу на основании их спектров, показывающих присутствие околозвездного вещества. Также как и звезды подтипа VY Scl, они расположены вблизи пробела периодов и обладают высокими светимостями. По-видимому, это родственные объекты с тем отличием, что звезды подтипа SW Sex имеют большие наклонения орбит и очень часто показывают затмения [15, 16]. Для них также характерны положительные и отрицательные сверхгорбы.

Поляры – системы содержащие магнитный белый карлик, обладающий мощным магнитным полем, которое полностью разрушает аккреционный диск и синхронизует вращение белого карлика с орбитальным вращением. Кроме орбитальной переменности, которая может вызываться изменением видимости аккреционных областей, в некоторых полярах могут наблюдаться быстрые квазипериодические колебания с масштабом времени 1-3 с. Эти колебания объясняются изменениями высоты фронта ударной волны в аккреционной колонне. Загадочным представляется то обстоятельство, что это явление встречается крайне редко. Такие колебания известны только в пяти полярах [17], тогда как их общее количество приближается к ста.

Промежуточные поляры образуют подгруппу катаклизмических переменных звезд, включающих несинхронно вращающийся магнитный белый карлик. Аккрецируемое вещество от внутренних частей аккреционного диска движется вдоль силовых линий магнитного поля и падает на магнитные полюса белого карлика. В промежуточных полярах вращение белого карлика не синхронизовано с орбитальным периодом двойной системы, и наклонение оси магнитного диполя белого карлика к оси его вращения является причиной строго периодических колебаний в рентгеновской и оптической областях спектра. Однако переработка рентгеновского излучения некоторыми частями двойной системы, которые вращаются в системе координат, связанной с орбитальным вращением, может вызывать оптические колебания с периодом биений. Эту

синодическую копию основных колебаний называют колебаниями в первой орбитальной боковой полосе. Могут наблюдаться колебания также и в других орбитальных боковых полосах. Обзор свойств промежуточных полярных приведен Хеллиером [18].

Кроме интересных особенностей переменности в оптике, катаклизмические переменные обладают рентгеновским излучением с разнообразными свойствами, а некоторые звезды и гамма-излучением, и потому активно наблюдаются с космических аппаратов. Рентгеновские наблюдения промежуточных полярных и сопоставление их результатов с результатами наблюдений в оптике представляется крайне важными, так как с помощью таких наблюдений можно выявить случаи необычного поведения аккреционного потока – так называемую аккрецию с обтеканием диска аккреционным потоком [19].

В настоящее время проблема генетической связи многообразия подтипов катаклизмических переменных представляется нерешенной. В течение более двадцати лет общепринятым считалось, что все подтипы катаклизмических переменных происходят от двойных звезд прошедших стадию общей оболочки и удерживающихся в состоянии контакта с перетеканием вещества благодаря потере углового момента, вызванной магнитным торможением и излучением гравитационных волн. Однако в этом случае времени жизни Галактики оказывается недостаточно, чтобы какие-либо катаклизмические переменные достигли минимальных наблюдаемых орбитальных периодов (немного короче часа). Поэтому в настоящее время рассматриваются альтернативные каналы происхождения катаклизмических переменных некоторых подтипов, в частности от сверхмягких рентгеновских источников, перетекание вещества в которых обеспечивается ядерной эволюцией вторичного компонента и происходит с темпом аккреции, достаточным для квазинепрерывного термоядерного горения аккрецируемого водорода [20, 21].

Планируемое в данном проекте изучение колебаний яркости ряда катаклизмических переменных, проведенное с высокой точностью, позволит

получить информацию о структуре аккреционных дисков и о процессах, протекающих в этих объектах. Это важно для классификации катаклизмических переменных и лучшего понимания их природы.

1.2 Хромосферно-активные двойные системы типа RS CVn

Тесные двойные системы поздних спектральных классов типа RS CVn являются в настоящее время объектами интенсивного изучения, главным образом из-за высокого уровня их магнитной активности, подобной солнечной. Звезды этого типа обладают мощными внешними конвективными оболочками. Считается, что высокий уровень их магнитной активности обусловлен совместным действием быстрого вращения (от нескольких часов до нескольких недель) и конвекции. Впервые стало известно, что многие звезды поздних спектральных классов, (F, G, M) проявляют активность, аналогичную солнечной, в 50-х годах XX века. Физические механизмы, определяющие все многообразие проявлений такой активности, связаны с магнитными полями, которые генерируются вихревой турбулентностью во внешних конвективных зонах этих звезд. Детальное изучение явлений звездной активности позволяет исследовать структуру магнитных полей, что имеет большое значение для развития теории звездного магнетизма и возможности проверки моделей солнечного динамо.

Можно выделить следующие проявления звездной активности:

1) Пятенная активность, которая проявляет себя во вращательной модуляции блеска и профилей фотосферных линий, вызываемой холодными пятнами на поверхности звезды; 2) Хромосферная активность, которая проявляется, прежде всего, в присутствии в спектрах активных звезд эмиссионных линий H α и H и K CaII и обычно связана с хромосферными факелами; 3) Вспышечная активность – скоротечные мощные выделения энергии во всех диапазонах от гамма-излучения до радиодиапазона; 4) Корональная активность. Она проявляется в сильном и переменном излучении в рентгеновском и радиодиапазоне.

Отличительной чертой всех наблюдаемых проявлений звездной активности является тот факт, что их энергетика на несколько порядков превышает аналогичные явления на Солнце.

Впервые запятненность была обнаружена в красной карликовой двойной системе YY Gem, а затем еще в одной похожей системе BY Dra, которая впоследствии дала название классу активных карликовых звезд. Начиная с 1970-х годов, началось активное исследование запятненных звезд, в том числе и с помощью космических аппаратов. В настоящее время известно несколько типов запятненных звезд самых различных масс и находящихся на различных стадиях эволюции: молодые звезды типа T Tau, проэволюционировавшие синхронизованные компоненты тесных двойных систем – системы типа RS CVn и W UMa, холодные карликовые маломассивные звезды типа BY Dra, одиночные гиганты типа FK Com. Объекты такого различного эволюционного статуса объединяет одно общее свойство – все они обладают внешними конвективными оболочками и быстрым осевым вращением, что, как полагают, вызывает развитие сильных магнитных полей. Обзоры свойств активных звезд и методов их исследования приводятся в работах Бердюгиной [22] и Гершберга [23].

Наиболее мощные проявления активности наблюдаются в двойных системах типа RS CVn. Звезды этого типа представляют собой класс тесных двойных разделенных синхронизованных систем с более массивным главным компонентом, который является гигантом, субгигантом или карликом спектрального класса G – K, и менее массивным вторичным компонентом – субгигантом или карликом спектрального класса G – M. На их кривых блеска обнаруживается вращательная модуляция с амплитудами до 0.6^m в полосе V, которая объясняется наличием пятен на фотосферах этих звезд. Спектральные наблюдения в линиях TiO показали, что пятна значительно холоднее окружающей фотосферы. Было обнаружено, что изменение интенсивности эмиссионных линий оказывается в противофазе с фотометрической переменностью – минимум блеска вращательной модуляции соответствует максимальной интенсивности в линиях H α и H и K CaII [24]. Это указывает на

то, что поверхностная активность этих звезд обусловлена локальными областями, которые включают в себя как эмиссионные яркие факелы и корональные петли, так и темные пятна (по аналогии с активными районами, наблюдаемыми на Солнце). Недавно было проведено первое обнаружение магнитных полей непосредственно в звездных пятнах по анализу поляризованного излучения спектральных молекулярных линий, которые образуются только при низких температурах в холодных пятнах [25]. Анализ как фотометрических, так и спектральных наблюдений звезд типа RS CVn, позволяет предположить присутствие значительного количества пятен на их поверхностях, покрывающих до половины видимого диска звезды.

Среди звезд типа RS CVn особый интерес представляют короткопериодические системы с орбитальными периодами меньше суток, так как в них ожидается более высокий уровень активности. В отличие от классических звезд типа RS CVn, в состав короткопериодических систем не входят субгиганты – эти системы состоят из быстро вращающихся карликовых компонентов.

С помощью фотометрических, спектроскопических и поляриметрических наблюдений за последние десятилетия удалось накопить некоторый объем информации об активных процессах на хромосферно-активных звездах, и главным образом, о холодных фотосферных пятнах, аналогичным солнечным. Рассмотрим их основные характеристики.

1. Температуры пятен.

Определение температур пятен основывается на совместном моделировании изменений яркости и цвета фотометрической кривой блеска звезды, результатах Доплеровского картирования и моделирования молекулярных спектральных линий, образующихся в холодных фотосферных пятнах [22]. Выяснено, что температура пятен T_{spot} составляет независимо от типа переменности звезды 2500 – 4500 К и растет к более горячим звездам. При этом разность температур невозмущенной фотосферы и пятен ΔT изменяется от

1000 – 2200 К у горячих G карликов, горячих компонент систем типа RS CVn и переменных типа FK Com до 300 К у самых холодных M звезд [26].

2. Фактор заполнения.

Площадь запятненных областей может достигать до 50 % поверхности звезды. Она показывает тенденцию роста к более быстровращающимся звездам (с уменьшением числа Россби) с достижением насыщения при значении числе Россби $Ro \approx 0.1 - 0.2$, то есть показывает зависимость, сходную с известными соотношениями для других индикаторов активности. Более того, найденная критическая величина числа Россби попадает в известную зависимость от высоты формирования индикатора активности (в более высоких слоях атмосферы насыщение начинается быстрее). Отмечается также тенденция понижения площади пятен к красному (полностью конвективные звезды) и синему (звезды без внешней конвективной оболочки) концам выборки.

3. Широты пятен.

Фотосферные пятна на карликовых звездах расположены в низких (холодные M карлики) и средних (более горячие G – K звезды различных типов) широтах [26]. Однако на многих звездах типа RS CVn были найдены так называемые полярные пятна (polar caps), например, на звездах HD 12545, AB Dor, UZ Lib. Эти полярные пятна представляют собой большие области с пониженной температурой, расположенные вблизи полюса звезды. Из 65 звезд, для которых была применена техника Доплеровского картирования, 36 показали наличие выдающихся полярных пятен, независимо от скорости вращения или эффективных температур [27]. До сих пор остается загадкой – реальны ли эти пятна или это технический дефект применяемой методики Доплеровского картирования, которое показывает такие неоднородности.

4. Активные долготы.

Общеизвестна секторная структура солнечного магнитного поля и солнечного ветра. Первые сообщения о существовании у звезд выделенных активных долгот появились в конце 80-х годов. Позднее аналогичные результаты были получены для всех типов запятненных звезд – классических RS CVn

переменных, запятненных карликов и звезд типа FK Com. Активные долготы в среднем разнесены на 180 градусов и различаются по своему уровню активности. Вблизи этих долгот также концентрируются области повышенной хромосферной активности, выходы локального магнитного поля и наиболее мощные вспышки. Бердюгина и Томинен [28] показали, что активные долготы на звездах типа RS CVn стабильны, но могут непрерывно мигрировать относительно орбитальной фазы и обычно не имеют предпочтительной ориентации.

Около 10 лет назад было обнаружено происходящее время от времени переключение доминирующей активной долготы с одной на другую – так называемый flip-flop эффект [28]. Подобные переключения часто показывают тенденцию к цикличности, хотя у некоторых звезд они могут происходить и нерегулярно. Эффект наличия и переключения активных долгот обнаружен в слабой степени и на Солнце.

5. Дифференциальное вращение.

По длительным рядам фотометрических наблюдений и доплеровских карт для ряда звезд проводились сопоставления найденных широт пятен с периодами осевого вращения звезды в соответствующие эпохи. Таким образом, для этих звезд были получены оценки дифференциального вращения. Полученные с помощью двухпятенной модели оценки дифференциального вращения восьми десятков активных двойных систем [29] показали, что у всех звезд экватор вращается быстрее полюсов (вращение солнечного типа), и существует зависимость коэффициента дифференциального вращения от периода осевого вращения звезды и заполнения полости Роша

$$\lg D_r = -2.02 + 0.79 \lg P_{\text{rot}} - 0.42 F,$$

действующая для всех типов запятненных звезд. Согласно формуле, дифференциальное вращение уменьшается к более быстро вращающимся звездам, и асимптотически приближается к твердотельному, что плохо согласуется с выводами теории динамо. В то же время, Доплеровское картирование показало для некоторых активных гигантов (V711 Tau, UX Ari, HU

Vir, V1794 Cyg) отрицательное значение коэффициента дифференциального вращения D_r , которое соответствует антисолнечному типу вращения (околополюсная зона вращается быстрее экваториальной). Признаки антисолнечного дифференциального вращения были обнаружены и у некоторых звезд солнечного типа по корреляции вращательного периода с ходом линии CaII H и K в течение цикла [30]. Вместе с тем, эти результаты тоже не являются окончательными, так как разные авторы дают для одной и той же звезды разный характер дифференциального вращения.

Таким образом, темные холодные пятна – самое наглядное проявление явлений магнитной нестационарности активности звезд. Детальное изучение пятенной активности – эволюции звездных пятен, их широтного и долготного распределения, циклов активности, а также корреляции запятненности с другими индикаторами активности и фундаментальными характеристиками звезд позволяет исследовать структуру магнитных полей, что имеет большое значение для развития теории звездного магнетизма и возможности проверки моделей солнечного динамо-механизма.

1.3 Тесные массивные двойные системы ранних спектральных классов

Тесные массивные двойные системы ранних спектральных классов – двойные системы, компоненты которых занимают верхнюю часть Главной последовательности. Их относят к системам, в эволюции которых большую роль играет обмен веществом между компонентами. Это приводит, в частности, к появлению нестационарных явлений: перетекания вещества с поверхности одного компонента на другой, образованию аккреционных дисков, выбросов вещества из системы и образованию околозвездной оболочки. Кроме того, температура звезд достаточно высока для того, чтобы каждый из компонентов терял значительное количество вещества посредством звездного ветра, что усложняет общую картину эволюции.

Исследование физических свойств массивных компонентов тесных двойных систем ранних спектральных классов необходимо для детального объяснения таких конечных стадий жизни эволюции звезд, как взрывы сверхновых и релятивистские объекты. Один из основных способов получения оценок звездных параметров (светимости, радиусы, температуры) – анализ фотометрических кривых изменения блеска. Из-за близости компонентов тесных двойных систем эволюция одного из них в определенные моменты времени начинает сказываться на эволюции другого. Это приводит к перетеканию вещества с одной звезды на другую и к накоплению газового вещества в окрестности двойной системы. Околозвездное вещество вносит свой вклад в получаемые фотометрические наблюдения. В результате анализ кривых изменения блеска в рамках моделей без учета общей оболочки не может обеспечить надежных значений физических параметров звезд. В работе Аввакумовой [31] была сделана попытка выделения вклада околозвездного газового вещества в наблюдения трех контактных массивных двойных систем ранних спектральных классов. Для выделения вклада околозвездного вещества в кривые изменения блеска были исследованы кривые остаточных уклонений – зависимость разности наблюдаемых и вычисленных (теоретических) значений блеска от фазы орбитального периода. Остаточные уклонения возникают из-за несоответствия используемой для расчетов модели двойной системы реальной как раз в силу присутствия около компонентов некоторого количества околозвездного вещества. Кривая остаточных уклонений позволяет оценить влияние неоднородных газовых структур на различных фазовых интервалах наблюдаемых кривых блеска. Исследование кривых остаточных уклонений большого количества звезд, схожих по физическим параметрам, необходимо для выявления общих (характерных для данной группы звезд) эффектов влияния околозвездного вещества на фотометрические наблюдения.

Сравнение кривых остаточных уклонений, построенных для разных фотометрических полос наблюдения, между собой позволяет качественно определить характер искажения излучения компонентов системы в общей

оболочке. Когда кривые остаточных уклонений изменяются при переходе от фильтра к фильтру, можно предположить, что механизмы, искажающие излучение, зависят от спектрального интервала наблюдений.

2 Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований

Основным методом исследования катаклизмических переменных и запятненных звезд типа RS CVn в данном проекте выбран фотометрический метод. Для запятненных звезд типа RS CVn в качестве дополнительного метода предполагается использовать также спектральные исследования.

Многолетние фотометрические наблюдения активных звезд типа RS CVn представляют ценный источник информации о характеристиках пятен и их локализации на фотосферах звезд, хотя и менее информативный, чем спектральные наблюдения. Однако фотометрические наблюдения запятненных звезд остаются актуальными и широко применяются, поскольку современные спектроскопические методы не могут их полностью заменить по следующим причинам:

1. Спектральные методы, в частности, доплеровское картирование, применимы лишь к достаточно ярким и быстро вращающимся звездам. Поэтому большая часть систем типа RS CVn остается недоступной этим методам. Единственно возможный метод исследования таких звезд – фотометрические наблюдения.

2. Фотометрические исследования любой звезды охватывают существенно более длительные периоды времени, чем спектроскопия высокого разрешения. Таким образом, фотометрические исследования запятненных звезд дают возможность поиска циклов активности, дифференциального вращения, активных долгот и других эффектов, обнаружение которых возможно лишь на базе длительных рядов наблюдений.

3. Что касается катаклизмических переменных, то метод высокоточной быстрой фотометрии на основе созданного в АО УрГУ автоматизированного

многоканального фотометра, позволяет на уровне мировых стандартов выявлять особенности структуры аккреционных дисков и процессов, протекающих в этих системах.

2.1 Фотометрические исследования

Для дифференциальных фотометрических наблюдений катаклизмических переменных звезд и хромосферно-активных звезд типа RS CVn мы считаем оптимальным применение 70-см телескопа системы Кассегрена и многоканального фотоэлектрического фотометра, который позволяет проводить непрерывные измерения световых потоков двух звезд и фона неба. Наблюдения полностью автоматизированы и проводятся под управлением компьютера, т.е. компьютер не только регистрирует результаты измерений, но и управляет работой телескопа и фотометра. Под управлением компьютера работают восемь шаговых двигателей, осуществляющих необходимые механические движения телескопа и фотометра.

В наблюдениях относительно ярких звезд (12^m - 13^m , телескопы класса один метр), многоканальные фотометры с фотоумножителями могут достичь такой же или более высокой точности по сравнению с ПЗС-матрицами в сходных условиях наблюдений [32]. Звезды типа RS SVn – яркие объекты (9^m - 11^m) и для них преимущества многоканальных фотометров перед ПЗС-системами очевидны. Катаклизмические переменные, как правило, более слабы (14^m - 15^m) и поэтому, чтобы увеличить количество регистрируемых фотонов, мы проводим наблюдения этих звезд в интегральном свете, что позволяет получить высокую точность измерений также и в этих случаях. Кроме того, наблюдения с многоканальными фотометрами позволяют получать равномерно распределенные во времени данные. В этом случае классические методы анализа, такие как преобразование Фурье, оказываются оптимальными и преимущественными по сравнению с многочисленными методами (например, периодограмма Ломба-Шаргле), предназначенными для анализа неравномерно распределенных во времени данных [33]. Но главное преимущество фотометров для наблюдений катаклизмических переменных и звезд с солнечно-подобной

активностью заключается в их высоком временном разрешении, которое не может сравниться с временным разрешением ПЗС-систем. Катаклизмические переменные обладают быстрой переменностью на временных масштабах до секунд, которые недоступны для ПЗС-систем. Имея большой опыт работы с фотометром, мы демонстрируем его преимущества и возможности примерами из нашей практики.

На рисунке 1 приведена блок-схема фотометра. Центрирование двух звезд в диафрагмах фотометра осуществляется путем поворота фотометра вокруг оптической оси телескопа и перемещения двух прямоугольных призм вдоль оптической оси. Такая конструкция выгодно отличается от конструкций большинства многоканальных фотометров, описанных в литературе. Эти фотометры для центрирования звезд в диафрагмах используют подвижные каналы. Поскольку каналы имеют значительный вес и, вследствие своей подвижности, могут подвергаться деформациям, когда телескоп отслеживает звезды, это не позволяет поддерживать центрирование звезд в диафрагмах малых размеров в течение наблюдательной ночи.

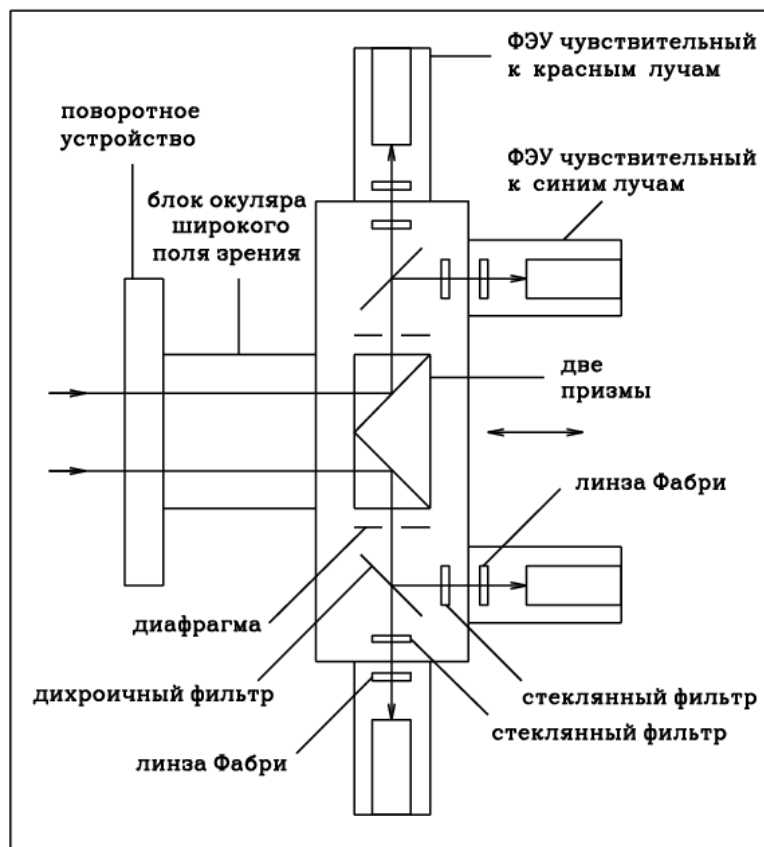


Рисунок 1.

Поскольку две звезды, программная звезда и звезда сравнения наблюдаются в многоканальном фотометре одновременно и при малом угловом разделении, такие наблюдения позволяют скомпенсировать влияние на результаты измерений поглощения света тонкими облаками и туманом и получать высокоточные данные в нефотометрических условиях. Эта возможность проиллюстрирована рисунком 2, который представляет результаты наблюдений затменной переменной звезды CM Dra на нашем фотометре. В верхней части рисунка показана видимая кривая блеска звезды сравнения. По ней хорошо видно, что только половина ночи имела высокую и стабильную прозрачность. Затем появился густой туман, поглощающий свет до 1.4^m , который вскоре поредел, продолжая вызывать изменения прозрачности атмосферы, достигающие до 0.4^m . В нижней части рисунка показана дифференциальная кривая блеска CM Dra, которая показывает, что поглощение света туманом хорошо скомпенсировано. Только наиболее густой туман, поглощающий свет до 1.4^m вызывает едва заметное искажение формы затмения CM Dra. Это место на кривой блеска обведено кружком. Вспышка, наблюдавшаяся в эту ночь в CM Dra и видимая в правой части кривой блеска, не могла бы быть обнаружена на одноканальном фотометре в условиях тумана.

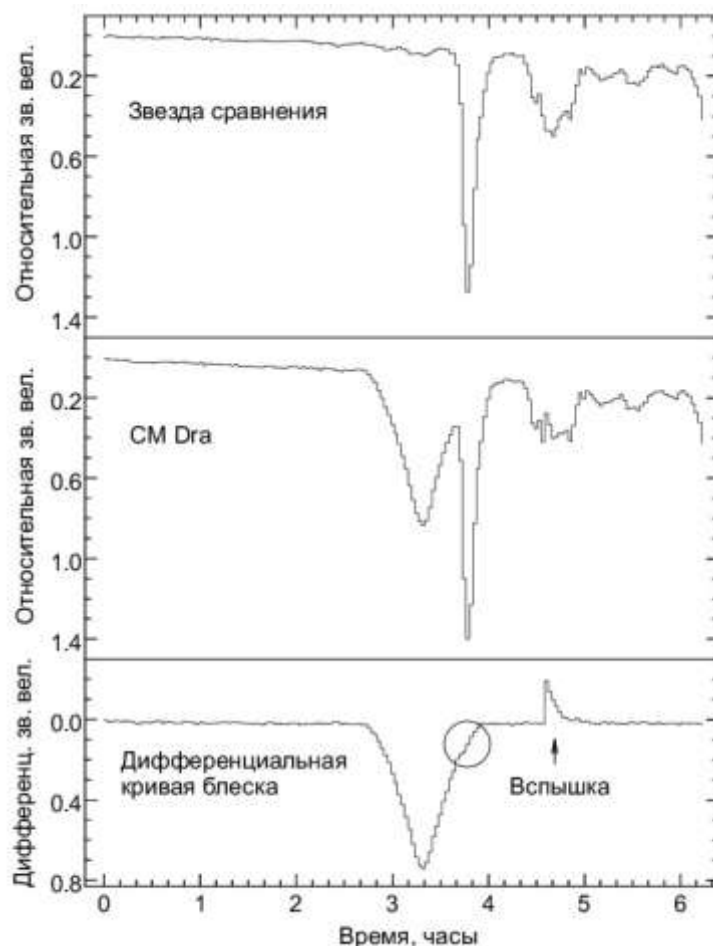


Рисунок 2.

Для обнаружения и анализа высокочастотных колебаний в промежуточных полях важно снизить высокочастотный шум в данных. Он состоит из фотонного шума, шума, вызываемого мерцанием звезд и шума, вызываемого дрожанием изображений звезд в диафрагмах фотометра. Дрожание изображений при малых угловых разделениях ($5'$ - $10'$) в значительной степени скоррелировано и его шум может быть частично погашен. Рисунок 3 демонстрирует способность многоканального фотометра подавлять этот шум. На рисунке представлены спектры мощности фотометрических наблюдений промежуточного поля V405 Aur, колебания которого имеют сложную форму импульса. Только первая и третья гармоники основного колебания обнаруживаются в спектре мощности данных одного канала фотометра (в середине рисунка), тогда как в спектре мощности дифференциальной кривой блеска дополнительно видно фундаментальное колебание и его вторая и пятая гармоники (в низу рисунка). Поскольку фотонный и сцинтилляционный шумы не

уменьшаются в дифференциальной кривой блеска, то улучшение обнаружимости колебаний происходит вследствие снижения шума, вызываемого дрожанием изображений в диафрагмах фотометра.

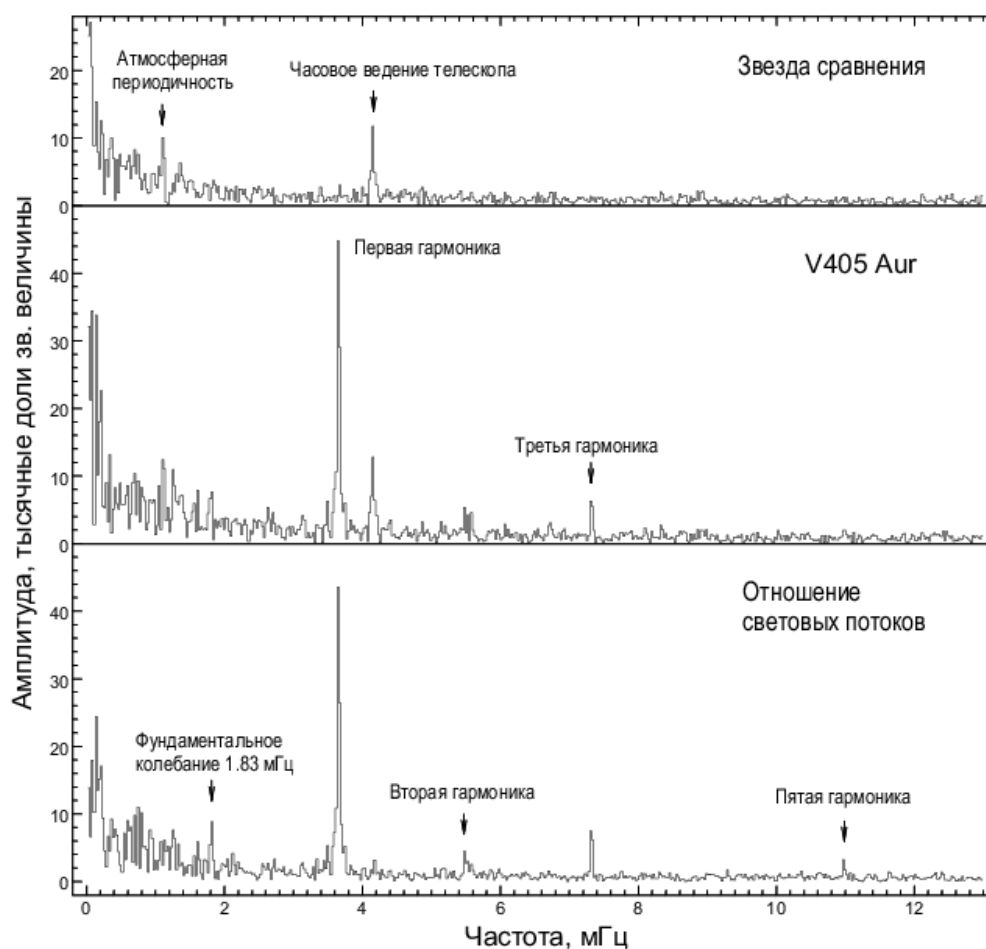


Рисунок 3.

При наблюдениях с многоканальным фотометром важно поддерживать точное центрирование звезд в диафрагмах фотометра в течение наблюдательной ночи. Для этого мы используем автоматическую гидирующую ПЗС-систему. С помощью ПЗС-системы компьютер регистрирует положение гидирующей звезды и исправляет неточности часового ведения телескопа, точно удерживая измеряемые звезды в центрах диафрагм. Рисунок 4 демонстрирует возможности гидирующей системы. На нем представлена кривая блеска переменной звезды V471 Тау, которая получена в режиме автоматического гидирования с диафрагмами размером 12". На ней видны изменения, вызванные запятнностью вторичного компонента системы V471 Тау и затмение первичного компонента — белого карлика. Во время наблюдений обычно

применяются диафрагмы больших размеров (16" - 23"), так как атмосферное качество изображений позволяет использовать диафрагмы 12" только в редких случаях.

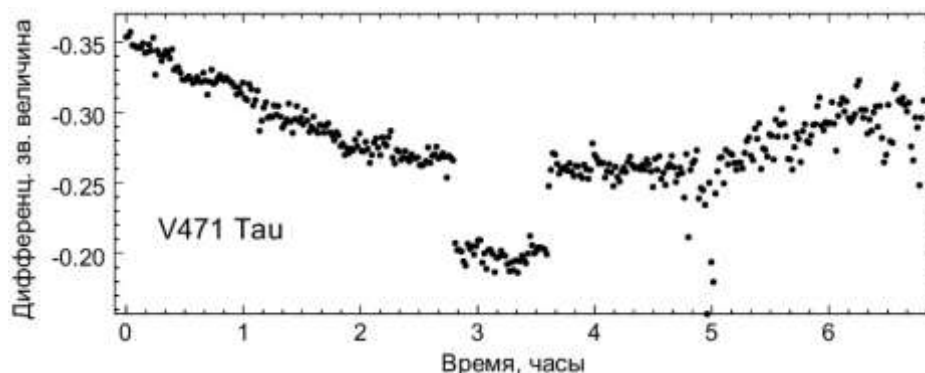


Рисунок 4.

Для обнаружения и наблюдения высокочастотных колебаний в промежуточных полярах необходимо высокое временное разрешение. Возможности фотометра для таких случаев демонстрирует Рисунок 5. На нем представлен спектр мощности данных промежуточного поляра V709 Cas, оптические колебания которого мы обнаружили впервые. Из рентгеновских наблюдений было известно, что этот промежуточный поляр имеет период 312 с. Приведенный спектр мощности показывает пик с этим периодом, также как и пик с периодом 318 с, который соответствует колебанию в орбитальной боковой полосе. Однако пики расположены в частотной области, где высока активность фликеринга, и при недостаточной продолжительности наблюдений эти колебания трудно обнаружить. Намного легче обнаруживается колебание с периодом 159 с, которое соответствует первой гармонике колебания в орбитальной боковой полосе, вследствие меньшего уровня шума в соответствующей частотной области. Ранее проведенные другими авторами ПЗС-наблюдения V709 Cas не позволили обнаружить оптических колебаний, так как имели недостаточное временное разрешение для регистрации первой гармоники и недостаточную продолжительность для регистрации основных колебаний.

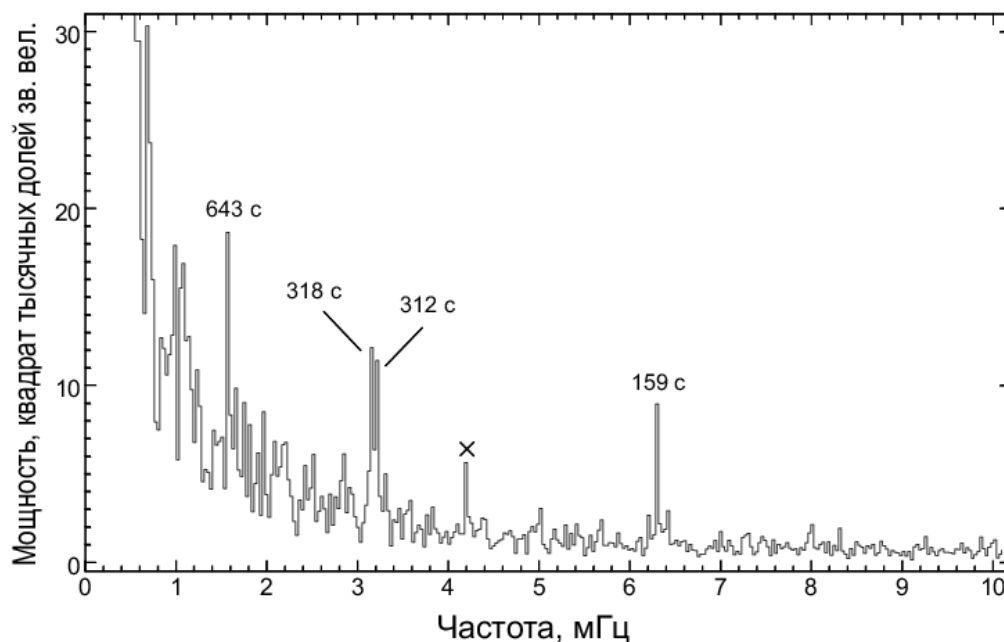


Рисунок 5.

2.2 Спектральные исследования

Спектральные наблюдения являются одним из основных средств исследования космических объектов в современной астрофизике. Большая часть знаний, которые были получены о физических свойствах астрофизических объектов, получены по анализу их спектров. Для исследования пятенной активности звезд используются спектры с высоким разрешением и с высокой чувствительностью приемников излучения. Для получения таких спектров, как правило, применяются эшелле кросс-дисперсионные спектрографы, позволяющие получать данные в широком спектральном диапазоне.

Рамсей и Нэйшнз [34] в 1980 году обнаружили в спектре системы V711 Tau (G5IV + K1IV) полосу TiO 8860 Å (она образуется при температуре ниже 3500 K) и связали ее с наличием холодных пятен в фотосфере одной из звезд системы. Позднее Фогт [35] нашел полосы TiO и VO у другой известной системы II Peg и показал их антикорреляцию с вращательной модуляцией блеска, обнаруженной по фотометрическим наблюдениям звезды, т.е. с запятненностью поверхности. В настоящее время разработана методика восстановления картины запятненности поверхности по исследованию молекулярных полос TiO, CO, OH, VO, которые

образуются при низких температурах в звездных атмосферах. Для независимого определения площади и температуры пятен необходимо рассматривать, по крайней мере, две полосы с различной температурной чувствительностью: отношения интенсивностей линий позволяют определить температуру пятен, а их величины – фактор заполнения. Чаще всего в этом методе используют пару полос окиси титана 7055 и 8860 Å. По ним, начиная с 90-х годов, были получены оценки параметров пятен для пяти проэволюционировавших звезд (EI Eri, II Peg, V1762 Cyg, λ And, V1794 Cyg) и четырех запятненных карликов (LQ Hy, AG Dor, V833 Tau, EQ Hy) [36, 37]. Также используются линии колебательно-вращательных переходов молекулы OH 15630 Å [36]. Согласно полученным результатам, пятна на исследуемых звездах имеют температуры 3500 – 4000 К и занимают 20 – 50% поверхности звезды. В этих работах спектр пятна задавался как спектр звезды более позднего спектрального класса.

Наиболее перспективным методом исследования звездных пятен с помощью спектральных наблюдений является доплеровское картирование. Идея метода основана на различии профилей спектральной линии, даваемых элементом поверхности с аномальной температурой или химическим составом, и элементом нормальной невозмущенной фотосферы. Результирующий профиль спектральной линии звезды будет содержать деталь (обычно квазиэмиссионную), сдвинутую эффектом Доплера в зависимости от фазы вращения на некоторую величину (см. рисунок 6).

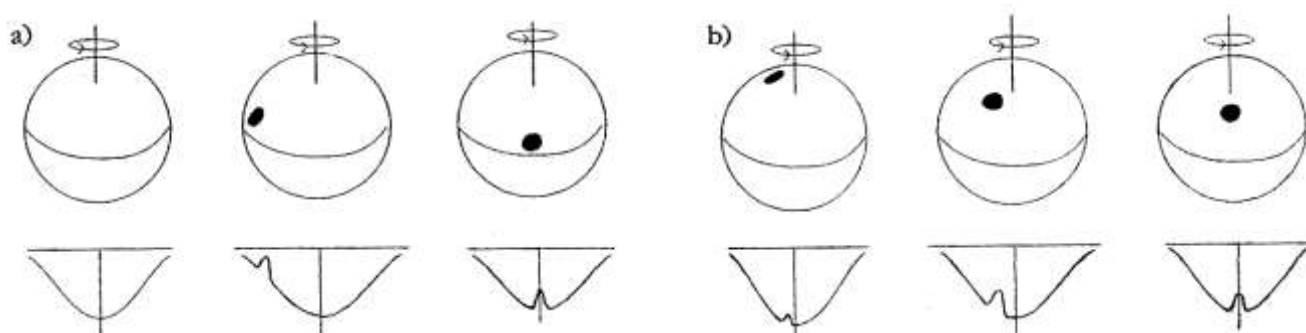


Рисунок 6.

Широтное распределение пятен определяется из оцененной по серии спектров амплитуды изменения лучевых скоростей детали в спектре звезды (чем выше широта, тем меньше доплеровский сдвиг).

Для получения правдоподобных температурных карт метод требует следующих условий:

1. Значительная скорость вращения звезды (>20 км/с), чтобы доплеровская ширина линии существенно превосходила все остальные источники уширения (например, ширину инструментального профиля). С другой стороны, при $V \sin i \approx 100$ км/с становится трудно отделить реальные изменения профиля от слабых бленд в спектре. Также величиной скорости вращения определяется плотность сетки интегрирования.

2. Для угла наклона оси вращения звезды наиболее предпочтительным считается среднее значение ($20^\circ < i < 70^\circ$), при котором не только видны все детали, но и возможно разделение между северным и южным полушарием. Ошибки в определении угла наклона, который оценивается из скорости вращения звезды и радиуса, также способны существенно исказить восстанавливаемую картину звездной поверхности.

3. Высокое спектральное разрешение получаемых спектров ($R > 40000$).

4. Амплитуда изменений профиля линии составляет обычно около 1 % от интенсивности континуума, поэтому требуется высокое (не менее 150) отношение сигнал/шум. В первых работах это требование пытались обойти путем наблюдений в более глубокой линии. В современных работах по доплеровскому картированию типичным является отношение сигнала к шуму около 400.

5. Требуется плотное (с минимальной частотой около 0.1 периода) фазовое перекрытие наблюдений. Фазовым перекрытием определяется также разрешение мелких деталей и дифференциация пятен между северным и южным полушарием.

6. Важно принять правдоподобную теорию переноса излучения. Для минимизации вероятных ошибок необходимо использование нескольких

спектральных линий, желательно формирующихся в условиях ЛТР. Использование линий сразу нескольких различных элементов может существенно сузить область возможных решений. Используемые линии должны быть неблендированными, и их параметры должны быть хорошо известны. Потребность доплеровского картирования в точных атомных данных привела к созданию Венской базы атомных данных VALD [38] – на сегодняшний день наиболее точной и обширной. В современных исследованиях используются линии FeI, NiI, VI, CaI.

Таким образом, доплеровское картирование налагает строгие ограничения не только на наблюдательную аппаратуру, но и на выбор объектов. В частности, оно применяется, в основном, к анализу запятненности звезд сравнительно большой светимости – классических систем типа RS CVn, FK Com и некоторых быстро вращающихся PMS звезд, и почти не используется для исследования запятненных карликовых звезд.

Принципиальным недостатком доплеровского картирования можно назвать трудность точной оценки температуры пятен. При температуре пятна ниже некоторого критического значения линии насыщаются, и их интенсивность от температуры не зависит, что приводит к недооценке разности температур. Вероятный выход – комбинирование спектральных методов с фотометрическими.

Вследствие большого количества ограничений на наблюдательную технику и параметры звезд, задача Доплеровского картирования в нашем проекте решаться не будет – возможности имеющегося в нашем распоряжении телескопа оказываются недостаточными.

В рамках данного проекта предполагается использование нового 1.2-м телескопа Астрономической обсерватории УрГУ, оснащенного оптоволоконным спектрографом высокого разрешения и ПЗС-камерой с системой охлаждения замкнутого цикла, который будет введен в строй в Астрономической обсерватории УрГУ в конце 2009 года. Получаемые спектры планируется использовать для анализа нестационарных процессов в хромосферах активных

звезд (по анализу изменения эмиссионной линии Н-альфа, Н и К CaII и др.), а также для построения кривой лучевых скоростей и дальнейшего определения фундаментальных параметров систем совместно с анализом фотометрических данных.

3 План проведения экспериментальных и теоретических исследований

3.1 Разработка программы фотометрических наблюдений катаклизмических переменных звезд на 70-см телескопе и многоканальном фотометре

Основным источником информации о катаклизмических переменных звездах для нас являются фотометрические наблюдения. Поэтому для наблюдений мы используем каждую пригодную для этого ясную ночь. К сожалению, поскольку катаклизмические переменные являются слабыми объектами, мы не можем использовать лунные ночи, а также светлые ночи в летнее время, которые продолжаются с 15 мая до 1 августа.

На основе проведенных нами фотометрических наблюдений, которые мы будем получать с помощью 70-см телескопа и многоканального фотометра, мы будем проводить поиск периодических колебаний блеска в недостаточно исследованных катаклизмических переменных звездах. Заранее мы не можем сказать, какого типа периодические колебания будут обнаружены, но они, будучи обнаруженными, укажут нам на строение наблюдавшейся системы, а также на строение и свойства аккреционных потоков в ней. Периодические колебания являются мощным зондом для таких исследований. Наиболее интересным представляется обнаружение колебаний блеска, вызванных вращением белого карлика (т.е. обнаружение промежуточного поляра). Большой интерес представляет обнаружение оптических колебаний уже открытого по наблюдениям в рентгеновской области спектра промежуточного поляра. Детальные исследования колебаний блеска уже известных промежуточных полярных звезд также представляют интерес. Имеются ли колебания блеска, вызванные

переизлучением рентгеновского излучения красным карликом, называемые колебаниями в орбитальной боковой полосе, какова форма импульса этих переизлученных колебаний, а также основных колебаний, имеются ли изменения с течением времени? Все это будет говорить о строении аккреционных потоков. Могут быть обнаружены интересные особенности колебаний блеска с орбитальным периодом или колебания типа сверхгорбов, которые также будут говорить о строении аккреционных потоков. Очень интересны отрицательные сверхгорбы. Причины их возникновения неясны. Есть подозрение, что они возникают в результате термоядерного горения аккрецируемого водорода на поверхности белого карлика. Это может указывать на генетическую связь катаклизмических переменных со сверхмягкими рентгеновскими источниками, в которых наблюдаются колебания похожие на сверхгорбы.

Каждая катаклизмическая переменная будет наблюдаться 4 - 15 ночей, а в некоторых случаях и больше, в зависимости от того, насколько интересными оказываются результаты предварительного анализа. Полученные в течение ночи дифференциальные кривые блеска будут анализироваться с помощью преобразования Фурье. Затем данные отдельных ночей будут объединяться в общий временной ряд и повторно анализироваться с помощью преобразования Фурье, а также дисперсионного анализа и путем сворачивания кривых блеска с найденными периодами колебаний. Целью анализа является обнаружение колебаний блеска и точное определение их характеристик, а именно периодов, амплитуд, форм импульса, времени когерентности, стабильности и т. п.

Для выбора звезд - кандидатов для наблюдений, кроме многочисленных литературных источников, были использованы постоянно обновляющиеся каталоги катаклизмических переменных и промежуточных полярнов: каталог Риттера и Колба <http://www.mpa-garching.mpg.de/RKcat/>, интерактивная база данных катаклизмических переменных <http://cvc.cat.net/> и домашняя страница промежуточных полярнов <http://asd.gsfc.nasa.gov/Koji.Mukai/iphone/>. В таблице 1 приведены данные о звездах, которые мы планируем наблюдать. Нужно отметить, что, поскольку катаклизмические переменные активно исследуются во

всем Мира, причем не только с поверхности Земли, но и с космических аппаратов, и открывается много новых катаклизмических переменных, мы не можем дать полный список объектов для наблюдений, а будем корректировать его с учетом новой информации. С другой стороны, не все объекты, приведенные в таблице 1, доступны для наблюдений в любое время. Катаклизмические переменные часто меняют состояние светимости, и некоторые из них могут временно оказаться недоступными для наблюдений. Когда наступит низкое состояние светимости какой-либо звезды и сколько оно продлится, предсказать невозможно. Поэтому мы не можем назвать конкретные сроки наблюдений какой-либо звезды и не можем гарантировать, что все объекты, приведенные в таблице 1, будут наблюдаться. В течение года можно детально пронаблюдать 2 - 3 катаклизмических переменных.

Таблица 1.

объект	подтип	литература	задача наблюдений
XSS J00564+4548 $\alpha=00^{\text{h}} 55^{\text{m}} 20^{\text{s}}$ $\delta=46^{\circ} 12' 57''$ $14.5^{\text{m}}-15.5^{\text{m}}$	вероятный промежуточный поляр	Bikmaev I.F. et al. 2006 AstrL 32, 588	поиск колебаний в орбитальной боковой полосе, уточнение периода вращения белого карлика
SDSS J080908+381406 $\alpha=08^{\text{h}} 09^{\text{m}} 08.39^{\text{s}}$ $\delta=38^{\circ} 14' 06.2''$ 15.5^{m}	неисследованная звезда подтипа SW Sex	Szkody P. et al. 2003 AJ 126, 1499	поиск орбитальной переменности и других периодических колебаний
LN UMa $\alpha=10^{\text{h}} 04^{\text{m}} 34.7^{\text{s}}$ $\delta=66^{\circ} 29' 15.1''$ $14.6^{\text{m}}-18^{\text{m}}$ наблюдения возможны в высоком состоянии	неисследованная звезда типа VY Scl или SW Sex	Rodriguez-Gil et al. 2007 MNRAS 374, 1359	поиск орбитальной переменности, сверхгорбов и других периодических колебаний
V533 Her $\alpha=18^{\text{h}} 14^{\text{m}} 20.5^{\text{s}}$ $\delta=41^{\circ} 51' 23.1''$ $14.4^{\text{m}}-16.4^{\text{m}}$ наблюдения возможны в высоком состоянии	возможный промежуточный поляр и звезда подтипа VY Scl	Thorstensen J.R., Taylor C.J. 2000 MNRAS 312, 629	нуждается в переоткрытии исчезнувших 30 лет назад колебаний с периодом 63 с
V378 Peg $\alpha=23^{\text{h}} 40^{\text{m}} 04.3^{\text{s}}$ $\delta=30^{\circ} 17' 47.7''$ 14.4^{m}	неисследованная катаклизмическая переменная	Koen C., Drosz J. 1997 IBVS N 4539	поиск орбитальной переменности и других периодических колебаний
EI UMa $\alpha=8^{\text{h}} 38^{\text{m}} 22.0^{\text{s}}$ $\delta=48^{\circ} 38' 02.1''$	вероятный промежуточный поляр	Reimer T.W. et al. 2008 ApJ 678, 376	поиск когерентных короткопериодических колебаний и орбитальной

13.1 ^m -16 ^m			переменности
1RXS J063631.9+35357 $\alpha=06^h 36^m 32.55^s$ $\delta=35^\circ 35' 43.3''$ 15.7 ^m наблюдения возможны при поярчании на 0.5 ^m	вероятный промежуточный поляр	Gansicke B.T. et al. 2005 MNRAS 361, 141	нуждается в уточнении периода вращения белого карлика: 1008 с или 930 с
IPHAS J025827.88+635234.9 $\alpha=02^h 58^m 28^s$ $\delta=63^\circ 52' 35''$ 14 ^m -15 ^m	недавно открытая звезда подтипа V Sge (объекты родственные сверхмягким рентгеновским источникам)	Witham A.R. et al. 2007 MNRAS 382, 1158	нуждается в обнаружении орбитальной переменности и построении орбитальной кривой блеска
BZ UMa $\alpha=8^h 53^m 44.1^s$ $\delta=57^\circ 48' 41.1''$ 10.2 ^m -15.9 ^m	Маловероятный промежуточный поляр	Neustroev V.V. et al. 2006 MNRAS 369, 369	Обнаружение орбитальной переменности и других периодических колебаний

3.2 Разработка программы многоцветных фотометрических наблюдений хромосферно-активных двойных звезд типа RS CVn на 70-см телескопе и многоканальном фотометре

Для наблюдений двойных переменных активных звезд будет использоваться 70-см телескоп и многоканальный фотометр Астрономической обсерватории УрГУ. Для выявления и анализа признаков магнитной активности этих звезд необходимо проводить длительные фотометрические наблюдения в течение ряда ночей, от 4 до 15, в зависимости от того, насколько быстро будет достигнуто полное фазовое перекрытие, с достаточно высоким временным разрешением (секунды). Высокое временное разрешение необходимо для регистрации скоротечных выбросов энергии, т.е. вспышек, аналогичных солнечным, а также для регистрации изменений блеска, вызываемых запятненностью компонентов системы, которые выражаются в виде вращательной модуляции блеска. Наблюдения будут проводиться квазиодновременно в 4-х фотометрических полосах В, V, R и I. Такие многоцветные наблюдения необходимы для определения показателей цвета. Анализируя изменения показателей цвета с течением времени, можно будет сделать выводы об активных процессах в этих звездах, а также узнать, какие

наблюдаются пятна на звездных фотосферах – холоднее или горячее окружающей фотосферы. Кроме того, многоцветные наблюдения требуются для дальнейшего анализа кривых блеска этих звезд и для определения коэффициентов dB/dV , dR/dV и dI/dV , которые представляют собой входные параметры для численного моделирования запятненности компонентов в рамках зональной модели. В результате численного моделирования ожидается получение параметров запятненных областей звездных фотосфер – плотности заполнения, площади запятненных областей, широт и температур пятен.

Был проведен выбор запятненных звезд, для которых возможны многоцветные фотометрические наблюдения на 70-см телескопе Астрономической обсерватории УрГУ. Выбор проводился на основе анализа нового Каталога хромосферно-активных двойных звезд [39], который включает 409 объектов, с использованием также международных баз данных (SIMBAD Astronomical Database, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) и опубликованных литературных источников (SAO/NASA Astrophysics Data System, http://adsabs.harvard.edu/ads_abstracts.html). В качестве критерия отбора учитывались координаты звезд (склонение больше 20 градусов), для которых возможны длительные наблюдения на географической широте АО УрГУ (57 градусов). В качестве второго критерия учитывался период вращения системы - отдавалось предпочтение короткопериодическим системам (с периодом меньше суток), поскольку для них есть возможность получить полное перекрытие фаз на кривых блеска в максимально сжатые сроки, что является важным для посредственных астроклиматических условий Урала, так как в некоторых системах типа RS CVn картина запятненности может изменяться в течение нескольких суток, что может внести существенные искажения в кривые блеска.

В таблице 2 представлены основные данные о семи активных звездах типа RS CVn, для которых возможны многоцветные фотометрические наблюдения на 70-см телескопе Коуровской Астрономической обсерватории. В течение года возможно провести полноценные фотометрические наблюдения 2 – 3-х звезд

данного типа. Список активных звезд будет корректироваться в соответствии с новой информацией, публикуемой в периодических научных изданиях.

Таблица 2.

Объект	Координаты	Период, сут.	Зв. величина,
DF Uma	$\alpha=11^{\text{h}} 37^{\text{m}} 24.7^{\text{s}}$ $\delta=+47^{\circ} 27' 43.8''$	1.030	11.4^{m}
SV Cam	$\alpha=06^{\text{h}} 41^{\text{m}} 19^{\text{s}}$ $\delta=+82^{\circ} 16' 02.4''$	0.5931	10.62^{m}
GU Boo	$\alpha=15^{\text{h}} 21^{\text{m}} 55.2^{\text{s}}$ $\delta=+33^{\circ} 56' 4.2''$	0.4887	12.9^{m}
V772 Her	$\alpha=18^{\text{h}} 5^{\text{m}} 49.7^{\text{s}}$ $\delta=+21^{\circ} 26' 45.2''$	0.8795	7.09^{m}
CG Cyg	$\alpha=20^{\text{h}} 58^{\text{m}} 14^{\text{s}}$ $\delta=+35^{\circ} 10' 29''$	0.6311	10.08^{m}
WY Cnc	$\alpha=09^{\text{h}} 01^{\text{m}} 56^{\text{s}}$ $\delta=+26^{\circ} 41' 23''$	0.8293	10.50^{m}
ER Vul	$\alpha=21^{\text{h}} 2^{\text{m}} 25.9^{\text{s}}$ $\delta=+27^{\circ} 48' 26.4''$	0.694	7.36^{m}

На основе получаемых многоцветных фотометрических наблюдений будет проводиться численное моделирование запятненности звездных фотосфер с помощью зональной модели. Эта модель представляет собой новый подход к анализу запятненных звезд, ориентированный на поиск общих свойств запятненных областей на звездах [26]. В основе этого алгоритма лежит положение, что пятна на активных звездах могут описываться двумя симметричными относительно экватора поясами с широтами от $\pm \varphi_0$ до $\pm (\varphi_0 + \Delta\varphi)$. Такое распределение пятен аналогично королевским широтам на Солнце, и,

как показало доплеровское картирование, наблюдается на некоторых запятненных звездах, например σ Gem, LQ Hya, HD31993. Важно, что в отличие от других моделей, данные о вращательной модуляции по многоцветным наблюдениям анализируются одновременно с данными о долговременных изменениях блеска звезды (на протяжении десятилетий), что дает возможность получать информацию о широтном распределении пятен. Полагается, что плотность заполнения поясов пятнами по долготе изменяется по линейному закону от единицы до некоторого числа f_{\min} , причем $0 < f_{\min} < 1$. Входными параметрами являются экстремальные точки в полосе V для каждого сезона наблюдений: разница между блеском незапятненной фотосферы и сезонным максимумом ΔV_{\max} , а также амплитуда вращательной модуляции ΔV . Помимо этих входных переменных, модель использует в качестве входных параметров определяемые из наблюдений коэффициенты dB/dV , dR/dV и dI/dV , углы наклона оси вращения звезды i , значения температуры фотосферы T_{phot} и ускорения силы тяжести $\lg g$. Определяемыми характеристиками зональной модели являются значения φ_0 , $\Delta\varphi$ и f_{\min} , из которых получают площади пятен S_{\max} и S_{\min} для более темной и более светлой полусферы звезды, и среднюю широту пятен $\langle\varphi\rangle = \varphi_0 + \Delta\varphi/2$. Четвертым определяемым параметром является контраст пятен β_v в полосе V , из которого определяется разность температур спокойной фотосферы и пятен, в предположении, что распределение энергии в спектре пятна такое же, как в спектре звезды более позднего спектрального класса.

Таким образом, моделирование запятненности звездных фотосфер позволит получать характеристики звездных пятен систем типа RS CVn в разные наблюдательные эпохи и сделать выводы об эволюции запятненных областей с течением времени.

4 Результаты экспериментальных и теоретических исследований I этапа

4.1 Проведение фотометрических наблюдений активной переменной системы CG Cyg, относящейся к типу RS CVn на 70-см телескопе

Фотометрические наблюдения затменной хромосферно-активной системы CG Cyg были проведены на 70-см телескопе и многоканальном фотометре в течение 11 ночей в августе, сентябре и октябре 2009 года, с целью мониторинга уровня активности этой системы и исследования характеристик запятненности фотосферы компонентов системы. Наблюдения проводились непрерывно в течение ясного ночного времени в эти ночи, в 4-х фотометрических полосах В, V, R и I квазиодновременно. Перед началом основных наблюдений проводилась процедура сравнения чувствительности каналов фотометра с помощью наблюдений звезды сравнения последовательно в обоих каналах фотометра. Звезды центрировались в диафрагмах размером 16", блеск звезд регистрировался с экспозицией 2 секунды по 24 отсчета на каждую фотометрическую полосу.

Проведена обработка полученных данных с помощью комплекса программ, разработанного для фотометрических наблюдений хромосферно-активных звезд: выполнена процедура вычитания фона неба из отсчетов звезд, определены дифференциальные звездные величины, вычислены юлианские даты каждой точки и определены орбитальные фазы согласно эфемериде из работы Прибуллы и др. [40]:

$$\text{HJD} = 2452490.4173 + 0.6311436E$$

В таблице 3 представлены данные о полученных наблюдениях: дата проведения наблюдений, гелиоцентрическая юлианская дата начала и завершения наблюдений, и общая длительность полученного ряда наблюдательных данных. Общая длительность наблюдений составила 64 часа наблюдений за 11 ночей.

Таблица 3. Журнал Наблюдений CG Cyg в 2009 году.

Дата, 2009 год	HJD начала наблюдений	HJD завершения наблюдений	Длительность, часы
27 августа	55071.22529	55071.468318	5.8
31 августа	55075.21284	55075.437812	5.4
8 сентября	55083.20356	55083.461680	6.2
10 сентября	55085.18275	55085.425778	5.8
29 сентября	55104.31717	55104.469920	3.7
30 сентября	55105.30031	55105.471115	4.1
2 октября	55107.14292	55107.340809	4.8
4 октября	55109.13212	55109.483477	8.4
5 октября	55110.13701	55110.316845	4.3
9 октября	55114.11482	55114.493281	9.1
12 октября	55117.11348	55117.365533	6.1

На рисунке 7 представлен пример участка кривой блеска звезды CG Cyg, полученной в течение одной из ночей (12 октября) в фотометрической полосе V, длительность полученного ряда 6.1 часа. Хорошо виден главный минимум системы, вызванный затмением вторичного компонента системы, глубина минимума составляет 0.64^m . По оси ординат отложены дифференциальные звездные величины, а по оси абсцисс время в условных единицах.

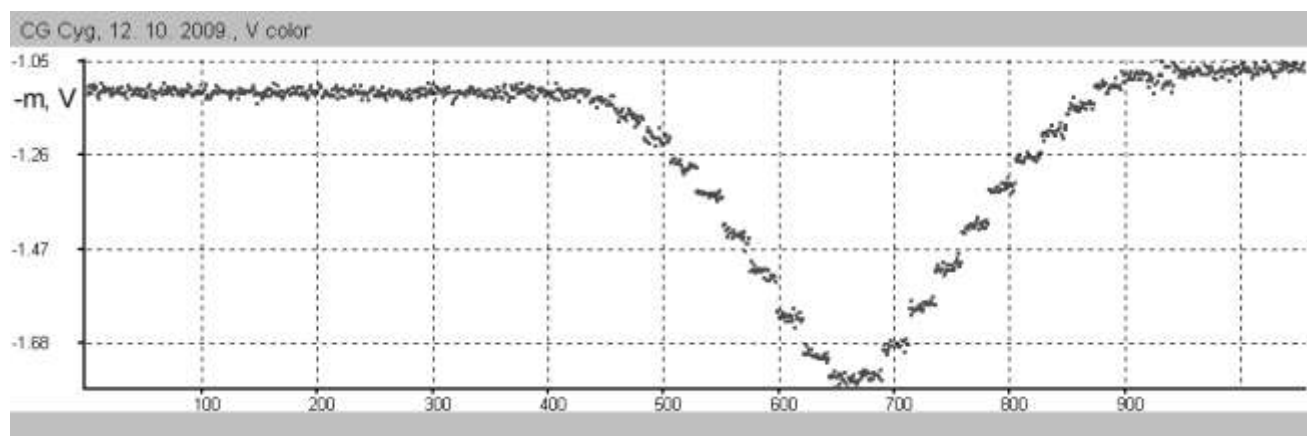


Рисунок 7.

Мониторинг блеска системы CG Cyg в течение 11 ночей (64-х часов наблюдений) показал отсутствие крупномасштабных выбросов энергии (вспышек) в этой системе. На следующем этапе планируется дальнейшая обработка, построение общей кривой блеска и проведение численного моделирования полученных наблюдательных данных с целью выявления признаков запятненности компонентов системы и определения характеристик запятненных областей.

4.2 Анализ фотометрических наблюдений катаклизмической переменной EI UMa, проведенных на 70-см телескопе в 2008 г.

Анализ наблюдений катаклизмической переменной EI UMa, проведенных нами в течение 13 ночей весной 2008 г., позволил обнаружить новые колебания блеска, не смотря на то, что эта звезда известна уже четверть века. Мы обнаружили колебания высокой степени когерентности, имеющие период 769.63 с, а также впервые обнаружили орбитальную переменность EI UMa. В рамках данного проекта был выполнен анализ орбитальной переменности.

На рисунке 8 показаны наиболее длинные дифференциальные кривые блеска EI UMa, полученные нами на многоканальном фотометре и 70-см телескопе. На глаз в них видны только типичные для катаклизмических переменных аperiодические колебания блеска, называемые фликерингом, однако детальный анализ позволяет обнаружить периодические колебания.

В верхней части рисунка 9 представлена низкочастотная часть спектра мощности общего временного ряда составленного из всех кривых блеска EI UMa. Этот спектр мощности позволяет обнаружить главный пик (F) и пики, вызванные суточной скважностью наблюдений (A), которые соответствуют орбитальному периоду. Главный пик соответствует периоду 6.45 ± 0.02 ч. Однако спектр мощности показывает значительный шум на самых низких частотах, маскирующий эти пики, и в данном случае обнаружение орбитальной переменности оказалось возможным благодаря тому, что орбитальный период EI UMa известен из спектральных наблюдений. Он равен 6.434 ч. [41].

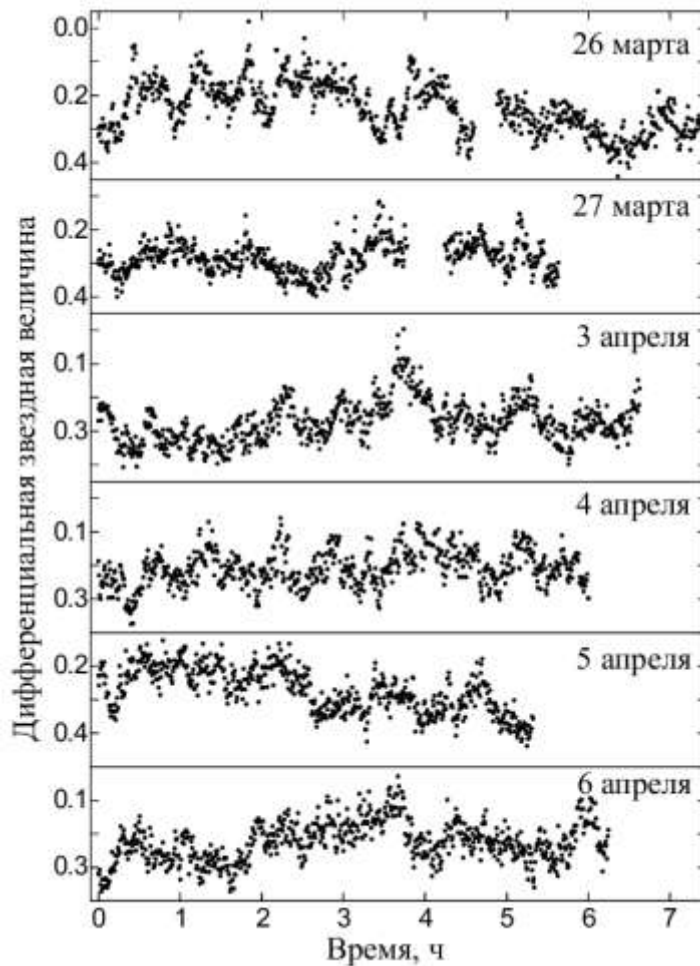


Рисунок 8.

По всей видимости, рост шума на низких частотах вызван отсутствием непрерывности данных на краях индивидуальных кривых блеска, а также неперiodическими изменениями от ночи к ночи, которые характерны для катаклизмических переменных. В этом убеждает спектр мощности, представленный в нижней части рисунка 9. Он вычислен для общего временного ряда, из которого исключены кривые блеска двух ночей 11 и 12 марта. Эти кривые блеска отдалены во времени от большинства других кривых блеска и поэтому могут подвергнуться большому неперiodическим изменениям. Действительно, на низких частотах этот спектр мощности показывает меньший шум, на фоне которого лучше выделяются пики, соответствующие орбитальному периоду. Главный пик соответствует периоду 6.45 ± 0.03 ч.

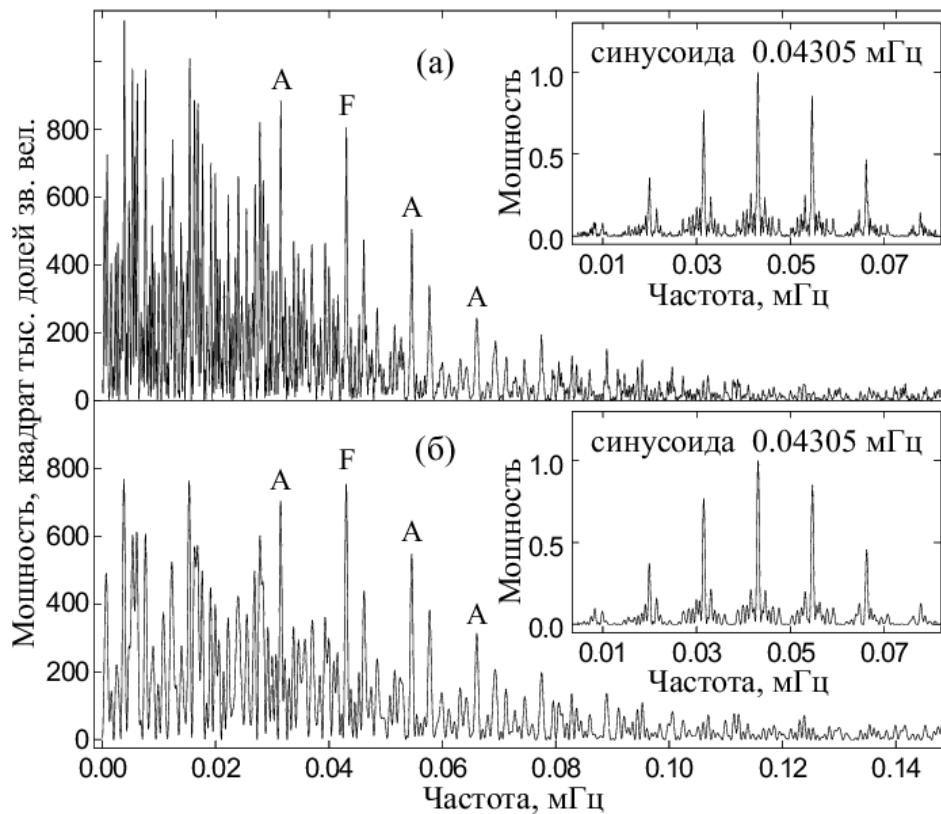


Рисунок 9.

Кривые блеска EI UMa, свернутые с орбитальным периодом, представлены на Рис. 10. На кривой блеска, полученной по всем данным (верхняя часть рисунка 10), виден широкий минимум (фазы 0.7 - 1.2). Внутри этого широкого минимума в фазе 1.0 можно заметить узкий минимум шириной приблизительно 0.1 фазы, смещенный от его центра на 0.1 фазы. В фазе 0.5 виден еще один узкий минимум приблизительно такой же ширины и немного большей глубины. Эти особенности орбитальной кривой блеска являются признаками затмений аккреционного потока, поэтому важно показать их повторяемость. Чтобы обнаружить повторяемость этих структур, мы разделили данные на две приблизительно равные группы 11 марта - 3 апреля и 4 - 11 апреля. Свернутые кривые блеска для этих групп показаны в средней и нижней частях рисунка 10. Обе кривые блеска отчетливо показывают широкий минимум в фазах 0.7 - 1.2, а также два узких минимума в фазах 1.0 и 0.5 несколько переменной ширины и глубины. Эта переменность может быть обусловлена влиянием фликеринга. Тем не менее, оба узких минимума видны в кривых блеска этих независимых групп

данных и, следовательно, являются повторяющимися. Существование этих деталей для двух независимых групп данных служит весомым аргументом в пользу их реальности.

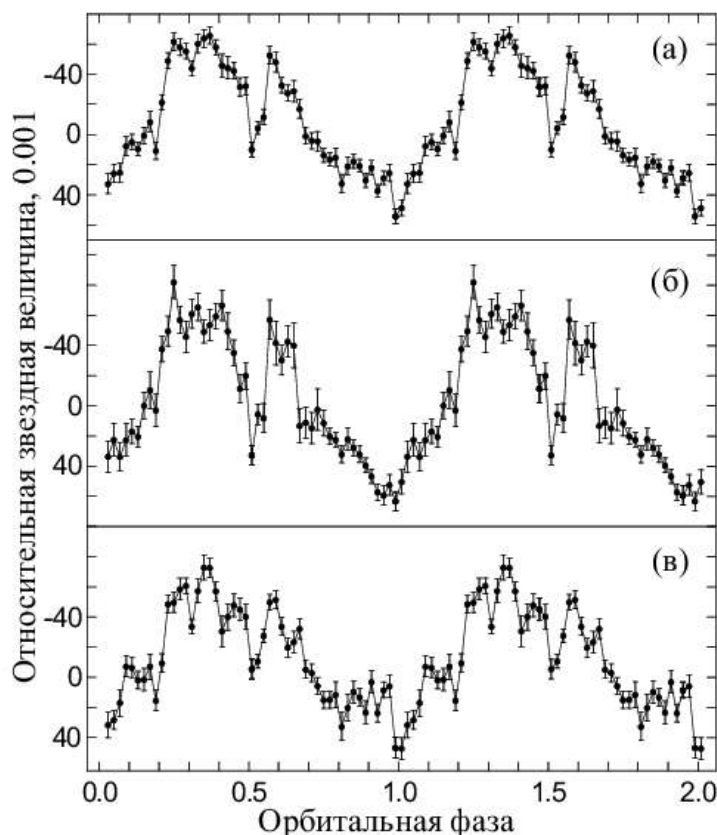


Рисунок 10.

Орбитальная кривая блеска показывает интересные особенности, которые могут быть поняты, если предположить, что в EI UMa происходят частичные затмения аккреционного потока. Мы основываемся на сходстве этой кривой блеска с орбитальными кривыми блеска трех промежуточных полярных звезд, а именно TV Col, FO Aqr и BG CMi (см. обзорную статью Хеллиера [42]). Вывод о частичных затмениях в этих объектах следует не только из формы их орбитальных кривых блеска, но и из поведения спектральных линий, а также из понижений рентгеновского потока. Подобно EI UMa, эти три звезды показывают широкие минимумы шириной 0.4 - 0.6 фазы со смещенными к их концу более узкими минимумами, а BG CMi - также и второй узкий минимум, отделенный половиной орбитального периода. Широкий минимум и находящийся внутри него узкий минимум могут быть объяснены затмением центральных областей аккреционным диском и находящимся в нем горячим пятном, образующимся в

том месте, где струя вещества ударяет в диск [43]. Второй узкий минимум может вызываться частичным затмением вторичного компонента диском или эллиптичностью диска [5].

4.3 Фотометрические наблюдения промежуточного поляра XSS J00564+4548 на 70-см телескопе

Наблюдения недавно открытого промежуточного поляра XSS J00564+4548 (в дальнейшем J00564) на 70-см телескопе и многоканальном фотометре были проведены в сентябре 2009 г. для того, чтобы выяснить, подвержены ли периодические колебания этого поляра долгосрочным изменениям и получить долгосрочную эфемериду колебаний.

Объект J00564 наблюдался на многоканальном фотометре 14, 15, 17 и 26 сентября. Общая продолжительность наблюдений составила 23.5 часа. Рисунок 11 представляет наиболее длинную дифференциальную кривую блеска, полученную 26 сентября и ее амплитудный спектр.

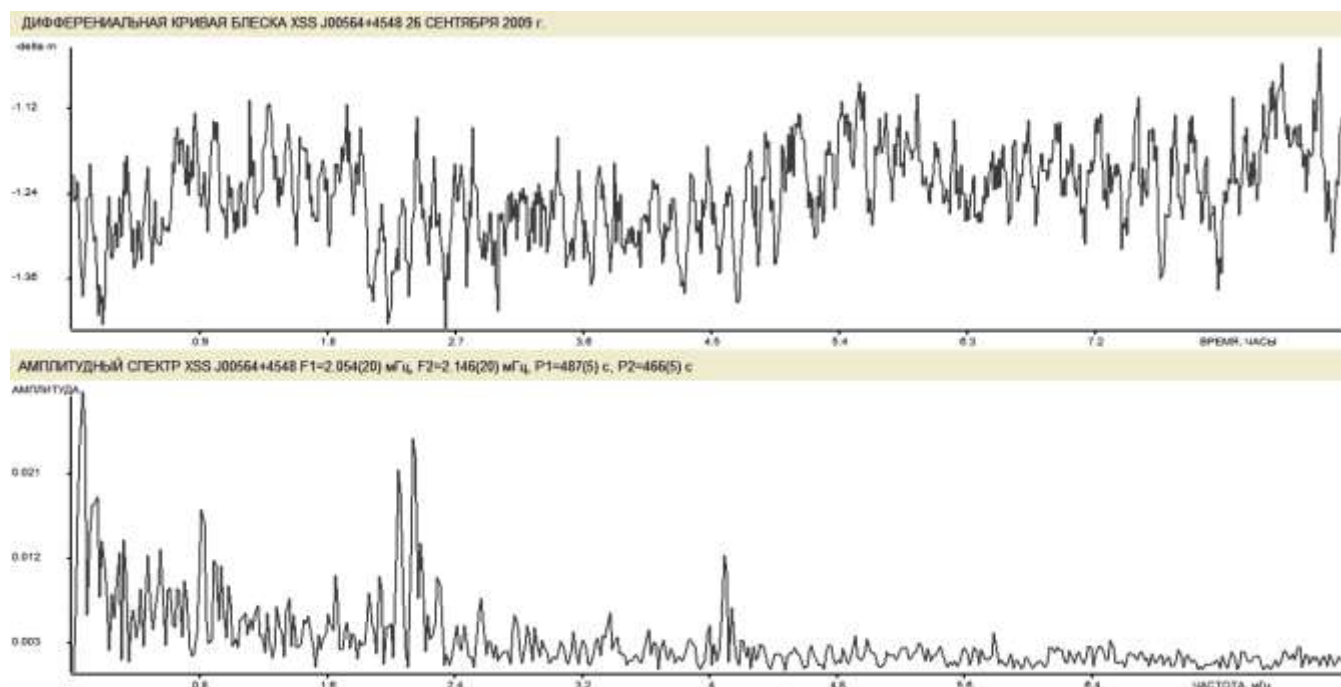


Рисунок 11.

Кроме фликеринга кривая блеска показывает периодические колебания. На глаз представляется, что они нестабильны. Однако амплитудный спектр,

вычисленный с помощью преобразования Фурье и показанный в нижней части рисунка 11, позволяет обнаружить здесь одновременно два колебания с периодами 487 и 466 с и первую гармонику колебания с периодом 487 с. Очевидно, что зрительный эффект неустойчивости возникает вследствие биений этих двух колебаний. Наблюдения промежуточного поляра J00564 будут продолжены до конца 2009 г. для того, чтобы, проанализировав новые наблюдения совместно с наблюдениями, полученными ранее в 2008 г. с высокой точностью измерить периоды колебаний и получить их долговременную эфемериду.

4.4 Проведение спектральных наблюдений хромосферно-активной звезды GSC 2038-0293 с целью построения кривой лучевых скоростей и дальнейшего определения физических параметров этой звезды

Недавно открытая в ходе программы оптического отождествления рентгеновских источников каталога ROSAT затменная система GSC 2038-0293 принадлежит к группе короткопериодических звезд типа RS CVn и показывает высокий уровень магнитной активности, что проявляется в переменности формы вращательной модуляции кривой блеска от сезона к сезону, и в переменном рентгеновском излучении короны звезды. Система обладает очень коротким периодом – 0.495 суток [44]. Только одна из 409 систем Каталога хромосферно-активных двойных систем показывает меньший период (XY UMa, 0.479 суток) [39]. Быстрый темп вращения может служить причиной высокого уровня магнитной активности GSC 2038-0293.

Для определения характеристик запятненности компонентов системы с помощью численного моделирования необходимо знать фундаментальные параметры системы. Их, в свою очередь, можно определить, на основе фотометрической кривой блеска и амплитуд лучевых скоростей звезды. Фотометрические наблюдения системы GSC 2038-0293 были проведены нами весной 2009 г. с помощью 70-см телескопа АО УрГУ, однако спектральных наблюдений системы никто ранее не проводил.

В рамках данного проекта предполагалось получить спектральные наблюдения GSC 2038-0293 на телескопе Цейс-2000 обсерватории на пике Терскол. Была составлена программа наблюдений и выбраны даты для полного спектрального покрытия орбитальных фаз (с учетом периода вращения звезды). Однако в отведенные нам даты наблюдений не было наблюдательного неба (была пасмурная погода). Поэтому по нашей просьбе были получены эшелле-спектры активной двойной системы GSC 2038-0293 на Российско-Турецком 1.5-м телескопе РТТ150 с помощью эшелле-спектрографа низкого разрешения TFOSK, оснащенного ПЗС-матрицей (2048 x 2048 элементов). Всего получено в течение нескольких ночей 14 спектров с разрешением $R=4000$ и отношением сигнал/шум в пределах 60-80, что позволит измерить лучевые скорости звезды с точностью около 3 км/сек. Для этого будет применен метод кросс-корреляции.

Кроме того, получен один эшелле-спектр системы GSC 2038-0293 с высоким спектральным разрешением $R=40000$ с помощью куде-эшелле спектрометра CES, оснащенного ПЗС-матрицей (1160 – 1040 элементов), производства САО РАН. Предварительный анализ уширения спектральных линий показал, что звезда обладает большой скоростью вращения, по крайней мере, больше 50 км/сек. Данный спектр с высоким разрешением можно будет использовать для анализа химического состава звезды. Спектры с низким разрешением будут использованы для определения лучевых скоростей звезды на разных фазах орбитального вращения, что даст основу для построения кривой лучевых скоростей.

Знание лучевых скоростей, вычисленных по спектральным наблюдениям, совместно с результатами «решения» фотометрической кривой блеска позволит определить фундаментальные параметры компонентов затменной системы – температуры, светимости, массы и размеры компонентов системы. Данные о температурах позволят провести моделирование запятненности с помощью зональной модели. Знание масс, размеров компонентов и расстояния между ними позволит сделать выводы о том, как зависят характеристики пятен от степени приливного влияния компонентов системы друг на друга.

4.5 Анализ результатов решения многоцветных фотометрических наблюдений тесных массивных двойных систем ранних спектральных классов

Для изучения влияния околозвездного газового вещества на фотометрические наблюдения массивных контактных двойных систем ранних спектральных классов проведено исследование кривых остаточных уклонений для звезды V701 Скорпиона. Кривые остаточных уклонений позволяют оценить влияние газового вещества общей оболочки на различных фазовых интервалах наблюдаемых кривых блеска, а также качественно описать характер искажения излучения компонентов системы. Для выбранной звезды доступны две эпохи наблюдений – 1966 и 1986 года, поэтому была возможность построить кривые остаточных уклонений для двух эпох наблюдений и сравнить их между собой. Такое сравнение позволяет проследить изменение кривых остаточных уклонений с течением времени. Если имеет место значительное изменение формы и вида кривых остаточных уклонений, то можно предположить изменение условий в околозвездной оболочке.

Сравнение кривых остаточных уклонений, полученных для разных фотометрических полос и эпох наблюдения, было выполнено при помощи корреляционного анализа. При этом соответствие друг другу остаточных уклонений одной и той же звезды, но для разных фотометрических полос наблюдения (UBV Джонсона) или разных эпох наблюдения, характеризуется коэффициентами корреляции. На рисунке 12 показаны кривые остаточных уклонений для V701 Скорпиона, построенные для нормальных кривых 1986 г. Барями показаны ошибки нормальных точек.

Рассчитанные степени переполнения компонентами критических полостей Роша звезды V701 Скорпиона подтверждают наличие околозвездного газового вещества вблизи компонентов системы. Сравнение значений расчетных радиусов компонентов этой системы указывает на то, что механизмы искажения излучения в газовом веществе вблизи системы по-разному проявляют себя в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

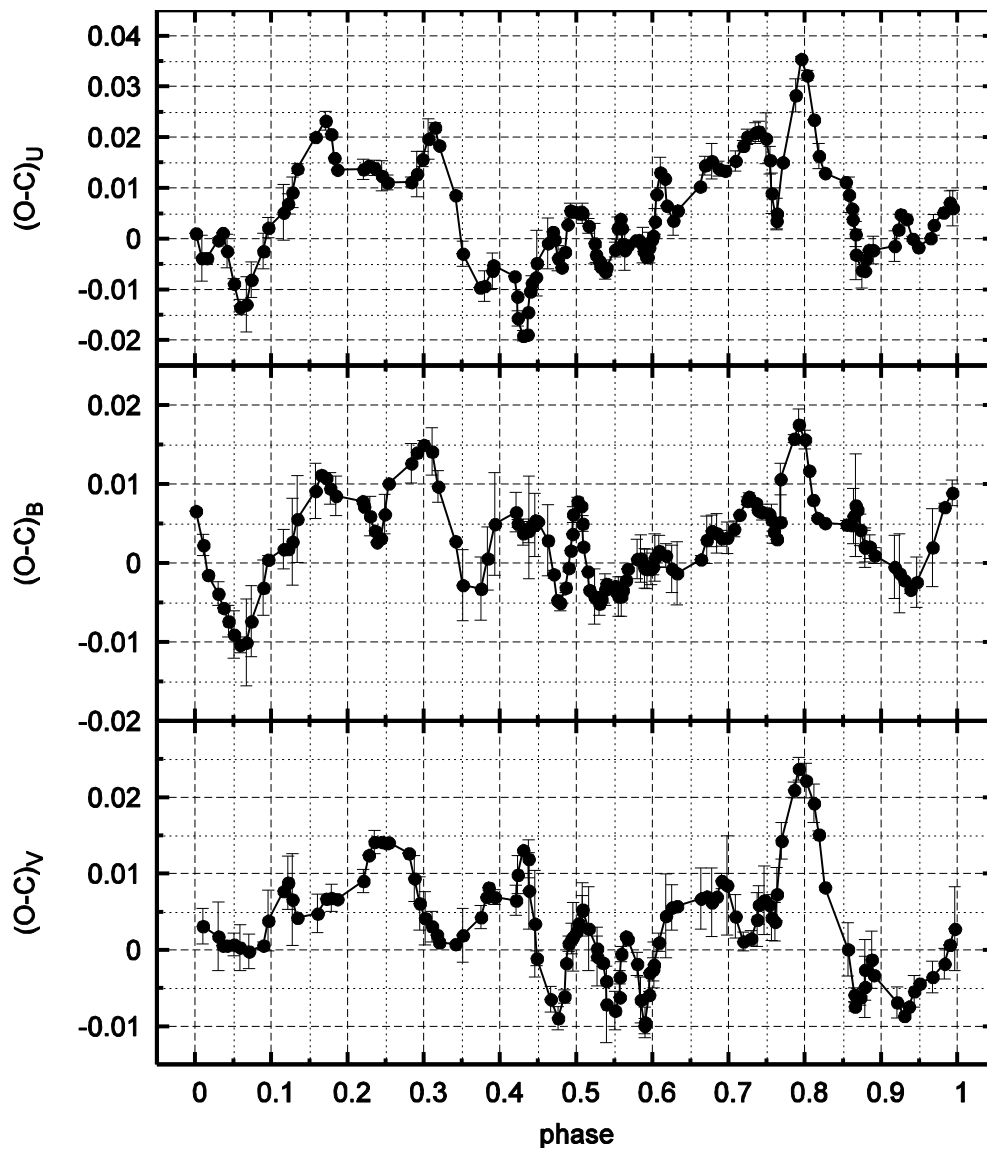


Рисунок 12.

Анализ кривых остаточных уклонений позволил сделать качественные оценки характера механизмов искажения излучения в околозвездном веществе вблизи компонентов двойной системы. Показано, что искажение излучения компонентов V701 Скорпиона носит в основном селективный характер и изменяется с течением времени.

5 Заключение

В ходе выполнения I этапа научно-исследовательской работы был выполнен аналитический обзор по проблеме фотометрического и спектрального исследования явлений нестационарности в 3-х типах тесных двойных систем: катаклизмических переменных, хромосферно-активных системах типа RS CVn и массивных тесных двойных системах ранних спектральных классов. Обоснован оптимальный вариант направления исследований, составлена программа дальнейших исследований и описаны результаты экспериментальных и теоретических исследований, проведенных осенью 2009 г.

На основе анализа многочисленных научных литературных источников и международных баз данных составлены списки из 9 звезд типа катаклизмических переменных и 7 хромосферно-активных систем типа RS CVn, для которых возможно проведение фотометрических наблюдений на 70-см телескопе Астрономической обсерватории УрГУ (телескоп АВР-2). Определены параметры наблюдательных программ: необходимые фотометрические полосы, экспозиции, оптимальная длительность наблюдений.

Получены и обработаны фотометрические наблюдения активной переменной системы CG Cyg, относящейся к типу RS CVn, на 70-см телескопе, оборудованном многоканальным электрофотометром, который позволяет проводить непрерывные измерения световых потоков двух звезд и фона неба. Проведенный мониторинг блеска звезды в четырех фотометрических полосах В, V, R и I в течение 64-х часов наблюдений в августе – октябре 2009 г. показал отсутствие крупномасштабных выбросов энергии в этой системе. Наблюдения покрывают все орбитальные фазы, что позволяет получить многоцветную орбитальную кривую блеска этой звезды и в дальнейшем построить модель запятненности фотосферы.

На основе детального анализа наблюдений катаклизмической переменной EI UMa, полученных на 70-см телескопе и многоканальном фотометре весной 2008 г., впервые обнаружена неоднородность структуры аккреционного диска в

этой звезде. Особенности орбитальной кривой блеска объяснены затмениями центральных областей аккреционным диском и находящемся в нем горячим пятном. Подтверждена принадлежность EI UMa к классу промежуточных полярков.

Выполнены в сентябре 2009 г. фотометрические наблюдения недавно открытой катаклизмической переменной XSS J00564+4548, являющейся промежуточным полярком. Эти наблюдения будут продолжены до конца 2009 г. Продолжительный интервал времени наблюдений этой звезды позволит измерить период вращения белого карлика с высокой точностью и получить долговременную эфемериду соответствующих колебаний блеска, а также выявить их характерные особенности.

Получены эшелле-спектры недавно открытой активной двойной системы GSC 2038-0293, с разрешением $R=4000$ с отношением сигнал/шум в пределах 60-80, что позволит измерить лучевые скорости звезды с ошибкой 3 км/сек. Знание лучевых скоростей, совместно с результатами анализа многоцветной фотометрической кривой блеска позволит определить фундаментальные параметры компонентов затменной системы – температуры, светимости, массы и размеры компонентов системы, а также позволит провести моделирование запятненности фотосферы звезды.

На основе анализа кривых остаточных уклонений многоцветных фотометрических кривых блеска тесной массивной двойной системы раннего спектрального класса V701 Скорпиона показано, что кривые блеска этой системы значительно искажены присутствием околозвездного вещества.

Проведенные фотометрические наблюдения тесных двойных систем с проявлениями нестационарности представляют ценный материал, который содержит большой объем информации. Их использование совместно с наблюдениями других обсерваторий позволит получить новые данные о свойствах и эволюции активных процессов на этих звездах, что важно для понимания природы явлений, происходящих в этих системах.

Результаты НИР, методы и базы данных будут использоваться в астрономических учреждениях РАН – ИНАСАН, САО, ИЗМИРАН и др., а также в ВУЗах, имеющих кафедры астрономии, астрофизики и физики космоса: Московском, Уральском, Челябинском, Казанском государственных университетах, Южном Федеральном университете и др.

Работы, выполненные на этапе № 1, удовлетворяют условиям государственного контракта, задания на выполнение поисковых научно-исследовательских работ, детализированного предложения о качестве поисковых научно-исследовательских работ, детализированного плана, отчетная документация в надлежащем порядке оформлена.

Список использованной литературы

1. Фриц и Брух (T. Fritz, A. Bruch) // *Astron. Astrophys.* 1998. V 332. P. 586.
2. Заманов и Брух (R.K. Zamanov, A. Bruch) // *Astron. Astrophys.* 1998. V 338. P. 988.
3. Брух (A. Bruch) // *Astron. Astrophys.* 2000. V 359. P. 407.
4. Марш (T.R. Marsh) // in: *Binary stars: selected topics on observations and physical processes*. Eds.: F. C. Lázaro, M. J. Arévalo, *Lecture notes in physics*, Vol. 563. Physics and astronomy online library. Berlin: Springer, 2001, P. 151.
5. Ким и др. (Y.G. Kim et al.) // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 441. P. 663.
6. Паттерсон и др. (J. Patterson et. al) // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2005.V. 117. P. 1204.
7. Реттер и Нейлор (A. Retter, T. Naylor) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2000. V. 319. P. 510.
8. Паттерсон и др. (J. Patterson et al.) // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2002. V. 114. P. 1364.
9. Муррей и др. (J.R. Murray et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2002. V. 335. P. 247.
10. Грейнер и др. (J. Greiner et al.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 343, P. 183.
11. Грейнер и др. (J. Greiner et al.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 376, P. 1031.
12. Муррей и Армитейдж (J.R. Murray, P.J. Armitage) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1998. V. 300. P. 561.
13. Фолкес и др. (S.B. Foulkes et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2005. V. 366. P. 1399.
14. Кожевников (V.P. Kozhevnikov) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 378. P. 955.
15. Шкоди и др. (P. Szkody et al.) // *Astron J.* 2003. V. 126. P. 1499.
16. Родригес-Гил и др. (Rodriguez-Gil et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 377. P. 1747.

17. Имамуре и др. (J.N. Imamura et al.) // Publ. Astron. Soc. Pacif. 2000. V. 112. P. 18.
18. Хеллиер (C. Hellier) // ASP Conf. Ser. 1999. V. 157, P. 1.
19. Феррарио и Викарамасинг (L. Ferrario, D.T. Wickramasinghe) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1999. V. 309. P. 517.
20. Кинг и Шенкер (A.R. King, K. Schenker) // ASP Conf. Ser. 2002. V. 261. P. 233.
21. Шенкер (K. Schenker) // ASP Conf. Ser. 2005. V. 334. P. 351.
22. Бердюгина (S.V. Berdyugina) // Living Rev. Solar Phys. 2005. V. 2. P. 8.
23. Р.Е. Гершберг // Активность солнечного типа звезд Главной Последовательности. 2002. Одесса: Астропринт.
24. Доррен и Гуинан (J.D. Dorren, E.F. Guinan) // Astrophys. J. 1982. V. 252. P. 296.
25. Бердюгина и др. (S.V. Berdyugina et al.) // Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. 2008. V. 384. P. 175.
26. И.Ю. Алексеев // Запятненные звезды малых масс. 2001. Одесса: Астропринт.
27. Штрассмеиер (K.G. Strassmeier) // Astron. Nahr. 2002. V. 323. P. 309.
28. Бердюгина и Туоминен (Berdyugina S.V., Tuominen I.) // Astron. Astrophys. 1998. V. 336. P. 25.
29. Генри и др. (G.W. Henry et al.) // Astrophys. J. Suppl. Ser., 1995. V. 97. P. 513.
30. Донахью и Бальюнас (R.A. Donahue and S.L. Baliunas) // Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, J.P. Caillault (ed). Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. 1994. V. 64. P. 396.
31. Е.А. Аввакумова, принята к печати в журнале «Письма в Астрономический журнал», 2010
32. Аббот и Клейнман (T.M.C. Abbott, S.J. Kleinman) // ASP Conf. Ser. 1994. V. 56. P. 407.
33. Шварценберг-Черни (A. Schwarzenberg-Czerny) // Baltic Astronomy. 1998. V. 7. P. 43.
34. Рамсей и Нейшенз (L.W. Ramsey, H.L. Nations) // Astrophys. J. 1980. V. 239. P. 121.
35. Фогт (S.S. Vogt) // Astrophys. J. 1981. V. 247. P. 975.

36. О'Нил и др. (D. O' Neal, S.H. Saar, J.E. Neff) // *Astrophys. J.* 1996. V. 463. P. 766.
37. Саар и др. (S.H. Saar et al.) // 2001, *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.* V. **223**. P. 1057.
38. Пискунов и др. (N.E. Piskunov et al.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999. V.138. P.119.
39. Экер и др. (Z.Eker et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2008. V. 389. P. 1722.
40. Прибулла и др. (T.Pribulla et al.) // *IBVS.* 2002. V. 5341. P.1.
41. Торстенсен (J.R. Thorstensen) // *AJ.* 1986. V. 91. P. 940.
42. Хеллиер (C. Hellier) // *ASP Conf. Ser.* 1995. V. 85. P. 185.
43. Паттерсон и Томас (J. Patterson, G. Thomas) // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 1993. V. 105. P. 59.
44. Франк и Бернхард (P. Frank and K. Bernhard) // *Open Europ. Journ. on Var. Stars.* 2007. V.1801. P.5964.